

博士論文 平成 25 (2013) 年度

デジタル昆虫図鑑のための
高精細 3DCG 作成技術の研究

Detailed Imaging, Modeling, and Rendering
Methods for 3D Digital Field Guide to Insect.

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科

森田 正彦

博士論文 平成 25 (2013) 年度

デジタル昆虫図鑑のための高精細 3DCG 作成技術の研究

論文要旨

図鑑は一般に対象物のイラストと解説文で構成されており、写真・印刷技術の普及による写真の掲載や、デジタル化による動画像などのマルチメディアの掲載といった拡張が行われた。今後は、対象物の特徴を詳細に捉えたコンピュータ・グラフィックス (CG) の掲載が考えられる。そこで本研究は、複雑な 3 次元形状や色・模様などのテクスチャ、マテリアル情報、動きを有した昆虫を対象とし、実計測を用いて高精細 3DCG を作成する技術を実現することを目的とする。

具体的には、下記の研究課題に取り組み、デジタル昆虫図鑑を実現するための技術を実現した。

3 次元形状モデルとテクスチャの取得法： 従来の手法では被写界深度の影響から適用が困難であった昆虫に対し、薄い光の膜を生成するスリット型光源の開発を行い、カメラのフォーカスエリアのみを照明することで周囲のぼけ成分を除去する方法を考案し、3 次元形状モデルとすべての画素にピントの合ったテクスチャの取得を可能とした計測法を確立、これを適用した計測装置を実現した。

マテリアル情報（透過・拡散）の取得法とレンダリング法： 従来の手法では取得が困難であった半透明物体と背景の距離に応じて見られる透過・拡散現象に由来するマテリアル情報を、画像から画素ごとに計測する手法を考案し、計測装置の開発、およびレンダリング法の研究を行い、半透明物体のモデリング手法を確立した。

動きの取得法： 自然環境で撮影した動画像からモーション情報を取得する手法を開発し、自然環境下における昆虫の動作をリアルに再現することに成功した。

提案技術を用いて、実際に昆虫の高精細 3DCG を掲載したデジタル昆虫図鑑を開発し、博物館・科学館において展示を行った。本論文の成果を広く公開することで、研究者・愛好家ら自らによる高精細 3DCG の作成が可能となり、地球規模での研究・学習用データベースの発展などが期待できる。

キーワード： デジタル昆虫図鑑、コンピュータ・グラフィックス、3 次元形状、テクスチャ、透過・拡散、動き

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科

森田 正彦

Doctoral Dissertation Academic Year 2013

Detailed Imaging, Modeling, and Rendering Methods for 3D Digital Field Guide to Insect.

Summary

The field guide generally consists of sketches, photos and expository texts depicting the details of a target object. In the future, use of multimedia like CG, which can capture clearer images of the target object, will be required in the field guide. The objective of this paper is to develop the technology for creating digital field guide to insects with clear images of CG, and we have developed three methods as follows.

A Method of Detailed CG Modeling with All-Focused Texture Image: CG Modeling of an insect has been difficult using conventional methods due to the effect of depth of field. We have made a slit type illumination device for lighting only the focus area and designed a new technique to measure three-dimensional surface and all-focused texture images of an insect while shifting the illuminated part of the slit light.

Modeling and Rendering of Heterogeneous Translucent Materials: In this paper, we propose a method to measure for each pixel from the image diffusivity and permeability, and a rendering method.

Capture of Insect Motion in the Natural Environment: We have created a motion capturing system for obtaining insect motions in the natural environment. The proposed method has succeeded in reproducing a realistic insect behavior.

We have developed this digital field guide to insects with a clearer CG model by using the proposed framework, and exhibited it in a museum and a science museum. The benefit of this paper enables researchers and enthusiasts to create clearer CG insect models. Therefore it is expected that research and learning database on a global scale will be developed.

Keywords: digital field guide to insects, computer graphics, three-dimensional surface, all-focused texture, diffusivity, permeability, insect motion

Graduate School of Media and Governance
Keio University
Masahiko Morita

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	2
1.1.1 昆虫図鑑	4
1.1.2 デジタル図鑑	6
1.1.3 デジタル昆虫図鑑	7
1.2 本研究の課題	9
1.2.1 3次元形状モデルとテクスチャの取得	10
1.2.2 マテリアル情報の取得	12
1.2.3 動きの取得	13
1.3 本研究の目的と進め方	14
1.4 本論文の構成	16
第2章 関連研究	17
2.1 デジタル昆虫図鑑	18
2.1.1 動画像を用いたデジタル昆虫図鑑	18
2.1.2 多視点の写真から、昆虫を回転して閲覧できるデジタル昆虫図鑑	18
2.1.3 CGを用いたデジタル昆虫図鑑	18
2.2 3次元形状モデル、テクスチャ取得に関する研究	19
2.2.1 接触式プローブを用いた方式	19
2.2.2 パターン投影法	19
2.2.3 共焦点法	19
2.2.4 ステレオ法	19
2.2.5 Depth from Focus 法	20
2.2.6 X線CT法	20
2.3 マテリアル(透過・拡散)の取得に関する研究	21
2.3.1 同一の物質からなる物体に対して透過・屈折率を推定する手法	21
2.3.2 人間の視覚心理から反射・透過を再現する手法	21
2.3.3 透過率・屈折率・白濁度を計測する手法	21
2.3.4 Henyey-Greenstein 散乱モデルを推定する手法	21
2.4 動きの取得に関する研究	22

2.4.1	光学式モーションキャプチャシステム	22
2.4.2	機械式モーションキャプチャシステム	23
2.4.3	磁気式モーションキャプチャシステム	23
2.4.4	機械学習によるマーカーレスモーションキャプチャシステム	23
2.4.5	昆虫を対象にしたマーカーレスモーションキャプチャシステム	23
第 3 章	3 次元形状モデル、テクスチャの取得法	24
3.1	はじめに	25
3.2	レンズモデル	27
3.2.1	薄凸レンズモデル	27
3.2.2	透視投影	28
3.2.3	ボケモデル	28
3.3	スリット型光源を用いた 3 次元形状モデルとテクスチャの取得法	29
3.3.1	理想照明による数値シミュレーション	29
3.3.2	スリット型光源を用いた数値シミュレーション	29
3.3.3	スリット幅と分解能についての検証	31
3.4	任意照明光による色情報の再計測法	34
3.5	まとめ	36
第 4 章	マテリアル情報 (透過・拡散) の取得法	38
4.1	はじめに	39
4.2	透過・ぼかし現象のモデル化	41
4.2.1	立体角	41
4.2.2	光度, 光束, 照度, 輝度	41
4.2.3	正透過率, 拡散反射率, 拡散透過率, 吸収率	44
4.2.4	薄サーフェイスモデル	45
4.2.5	ぼかしモデル	45
4.3	測定法	48
4.3.1	透過率 α , および半透明物体の色 $\Gamma(\mathbf{P})$ の推定法	48
4.3.2	正透過率 ι , 拡散透過率 κ_t の測定法	50
4.4	レンダリング方法	52
4.5	実験	54
4.5.1	測定装置の検証	54
4.5.2	昆虫の羽の測定	54
4.5.3	手すき和紙の測定	58
4.5.4	測定方式の検証	58
4.6	まとめ	61

第5章	動きの取得法	62
5.1	はじめに	63
5.2	簡易モーションキャプチャシステム	64
5.2.1	座標の手動抽出	65
5.2.2	特徴点座標の調整	66
5.2.3	ガイド動画の出力	68
5.3	まとめ	69
第6章	実用と応用	70
6.1	コンテンツ作成	71
6.1.1	データ取得	71
6.1.2	3次元形状モデルの修正	71
6.1.3	3次元形状モデルの合成	72
6.1.4	テクスチャの再適用・境界調整	73
6.1.5	アニメーションの作成	74
6.2	デジタル昆虫図鑑の開発・展示	75
6.2.1	web デジタル昆虫図鑑	75
6.2.2	成長過程を扱ったデジタル昆虫図鑑	75
6.2.3	インタラクティブ・デジタル昆虫図鑑	76
6.2.4	ステレオ 3D デジタル昆虫図鑑	77
6.3	生物への応用	80
6.4	工業・製造業への応用	82
6.5	展示・評価	83
第7章	未来の図鑑	84
7.1	自然環境の情報を利用した図鑑	86
7.2	携帯型端末を利用した図鑑	88
7.3	3D 造形技術を利用した図鑑	90
7.4	3D 図鑑・研究用図鑑	92
第8章	結論	93
8.1	本論文の成果	94
8.2	今後の課題	97
付録A	昆虫CGのアニメーション	109
A.1	カミキリムシ	110
A.2	クワガタムシ	111
A.3	ゾウムシ	112

付 録 B ステレオ 3D デジタル昆虫図鑑	113
付 録 C 工業・製造業への応用、常設展示物の制作	117
付 録 D 展示一覧	119

目 次

図 1.1	本草綱目	3
図 1.2	訓蒙図彙	3
図 1.3	画本虫えらみ	4
図 1.4	千虫譜	5
図 1.5	日本千虫図解	5
図 1.6	日本産ゾウムシデータベース	8
図 1.7	図鑑の歴史と用途	9
図 1.8	デジタル昆虫図鑑実現のための関連技術	9
図 1.9	昆虫がもつ複雑な 3 次元形状の例	10
図 1.10	昆虫がもつ複雑なテクスチャの例	11
図 1.11	昆虫がもつマテリアルの例	13
図 1.12	デジタル昆虫図鑑作成のためのフレームワーク	14
図 2.1	光学式モーションキャプチャーシステムの例	22
図 3.1	一般的な手順と高輝度部位のボケによる影響	25
図 3.2	薄凸レンズモデル	27
図 3.3	シミュレーション用のサンプル	30
図 3.4	シミュレーション結果	31
図 3.5	実際の輝度値の変化 (昆虫を撮影)	32
図 3.6	スリット光モデル	32
図 3.7	スリット光モデルを用いたシミュレーション結果	33
図 3.8	標準サンプル	33
図 3.9	各移動量と各スリット幅による撮影を行った場合の奥行き分解能	34
図 3.10	スリット光によるテクスチャ	36
図 3.11	ディフューザーと蛍光灯を用いた撮影システム	36
図 3.12	任意の照明で再計測・再構成したテクスチャ	37
図 3.13	開発した撮影装置	37
図 4.1	紙に見られるぼかし現象	40
図 4.2	立体角	41

図 4.3	点光源	41
図 4.4	均等拡散反射面の輝度分布	42
図 4.5	均等拡散反射面の光度分布	42
図 4.6	均等拡散透過面の輝度分布	42
図 4.7	均等拡散透過面の光度分布	42
図 4.8	輝度不変則	44
図 4.9	光の関係	44
図 4.10	サーフェイスモデルによる光学現象	45
図 4.11	ぼかしモデル	46
図 4.12	ぼかし関数 D_b	47
図 4.13	透過率測定時の照明環境	48
図 4.14	試作した測定装置	54
図 4.15	白背景で撮影した羽 ImgB_1	56
図 4.16	グレイ背景で撮影した羽 ImgB_2	56
図 4.17	求まった昆虫の羽の透過率 ImgA	56
図 4.18	昆虫の羽に対して透過現象を適用した例	57
図 4.19	手すき和紙に対して透過・ぼかし現象を適用した例	57
図 4.20	平均差 $\text{Dif}(\text{ImgKt}_0, \text{ImgKt}_d)$	58
図 5.1	昆虫の大まかな構造	64
図 5.2	動きを構成する関節 (左) と抽出結果 (右)。	64
図 5.3	手動で取得した特徴点の座標データ	66
図 5.4	移動成分を除去した座標データ	67
図 5.5	回転成分を除去した座標データ	68
図 6.1	3次元形状モデルの修正	71
図 6.2	3次元形状モデルの合成	72
図 6.3	テクスチャの境界調整	73
図 6.4	アニメーションの作成	74
図 6.5	web デジタル昆虫図鑑	75
図 6.6	X 線 CT 計測で得られたボリウムデータを用いた可視化	76
図 6.7	エゴヒゲナガゾウムシの成長観察	76
図 6.8	インタラクティブ・デジタル昆虫図鑑システムのアウトライン	77
図 6.9	インタラクティブ・デジタル昆虫図鑑	77
図 6.10	ステレオ 3D 映像制作における動きの早いシーンへの対処	78
図 6.11	ステレオ 3D 映像制作における拡大シーンへの対処	78
図 6.12	クロストーク低減のための対処	79
図 6.13	3次元内部構造顕微鏡で取得された断面画像	80

図 6.14	本研究の技術によるテクスチャのあり / なしの比較	80
図 6.15	中身が見える！生物図鑑	81
図 6.16	VCAD システム研究プログラム 常設展示システム	82
図 7.1	デジタル図鑑の未来	85
図 7.2	環境情報を利用した VR システム	86
図 7.3	自然環境の情報を利用した図鑑	87
図 7.4	モバイル型端末を利用した図鑑	88
図 7.5	3D 造形技術を利用した図鑑	90
図 7.6	昆虫が有する毛と構造色の例	92
図 8.1	今後の課題	97
図 C.1	VCAD システム研究プログラム 常設展示システム図面	118

表 目 次

表 1.1	マテリアルの種類	12
表 2.1	主要な 3 次元形状計測法	20
表 3.1	サンプル送り量とスリット幅の比較	35
表 4.1	測定装置の検証	55
表 4.2	取得した画像	55
表 4.3	測定によって求めた透過率, 物体色	59
表 4.4	和紙越しに羽ばたく蝶のレンダリング画像	60
表 5.1	手動で取得した特徴点 $P_{\text{部位},t}$	65
表 A.1	取得した動きを適用したカミキリムシの歩行アニメーション	110
表 A.2	取得した動きを適用したクワガタムシの歩行アニメーション	111
表 A.3	取得した動きを適用したゾウムシの歩行アニメーション	112
表 B.1	上映用ステレオ 3D デジタル昆虫図鑑のシナリオ	114
表 D.1	デジタル昆虫図鑑システムを用いた展示	120

第 1 章

序論

本章では、はじめに研究背景として図鑑について述べ、次にデジタル昆虫図鑑のための3DCG作成の課題を整理し、本研究の目的、提案手法と本論文の構成について述べる。

1.1 本研究の背景

地球上で人類が生活するために、野生の植物や動物、天然の鉱物を同定することは、生死を分ける重要な問題である。それは、目の前の植物が食べられるものか否か、薬になるものか否かを、自らの身をもって試さずに知ることができるためである。よって、対象の同定を手助けする図鑑は人類にとって重要な位置づけを持った資料であると言え、その種類は植物、動物、鉱物の他には昆虫、鉄道、航空機、宇宙、人体、地図、切手、美術など様々なものが存在する。

図鑑の前身となった書物は対象の分類を目的に作成されており、解説文と分類された名称が列挙される形式をとる。1～2世紀頃出版された神農本草経[1]は、植物・動物・鉱物など365種が集録されており、人体への影響の強度によって薬物を3つに分類し、整理した書物である。神農本草経を元に作成された本草経集注[2]には730種が収録されており、分類がさらに細かく行われている。

後に、対象の解説文とその特徴を捉えたイラスト、あるいは写真によって構成された図鑑が生まれる。本草綱目[3]は、薬用植物、動物、鉱物など約1900種が収録されており(図1.1参照)、従来の書物に比べ対象の記述が優れていることから、日本においては幕末に至るまで基本文献として尊重されたとされている[4]。訓蒙図彙[5]は、日本初の百科図鑑と言われており[4]、天文・地理や道具・動植物などについて掲載されている(図1.2参照)。草木写生春秋之巻[6]は、園芸植物を中心とした284種が収録された図鑑である。17世紀後半では、百科図鑑、園芸植物や貝[7][8]など、趣味の分野での学習書としての意味合いをもった図鑑が出版されるようになる。

図鑑は、種の分類を目的とした書物から始まり、同定のために対象の特徴をイラストで収録した。イラストは、より対象を詳しく表すために多色化され、後に写真に置き換わった。専門家のための図鑑や網羅的な図鑑から、近年は特定の種やコンセプトに絞った図鑑などが出版されている。



画像出典：国立国会図書館デジタル化資料より

図 1.1: 本草綱目

表紙（左上）、鉱物（右上）、植物（左下）、動物（右下）



画像出典：国立国会図書館デジタル化資料より

図 1.2: 訓蒙図彙

天文（左上）、道具（右上）、海中生物（左下）、植物（右下）

1.1.1 昆虫図鑑

人間と昆虫の関わり合いは深く、農業においては農作物に害をなす害虫の駆除や、受粉のために昆虫を活発に利用している。例えば、ヒメハナカメムシ属のナミヒメハナカメムシ、ヒメハナカメムシ、タイリクヒメハナカメムシ等はダニ、アブラムシなどの害虫の卵を食べることが知られている [9]。また、サシガメの種はトコジラミや毛虫、松の木につくマツカレハを捕食することが知られている [10]。昆虫の特徴を捉えたイラスト、写真と解説文が掲載された図鑑を用いて害虫を同定することによって、その天敵となる昆虫を適切に選択し使用することができる。

日本には、確認された個体で 32,000 種、推定では 10 万種以上の昆虫が生息しているといわれており [11]、昆虫の姿を描いた古い文献が多く残されている。1788 年に出版された画本虫えらみ [12] は、昆虫の絵と昆虫を題材とした狂歌で構成された文献である (図 1.3 参照)。1811 年に出版された千虫譜 [13] は、昆虫や爬虫類など 645 種が収録されており、雄・雌の特徴が図示されている (図 1.4 参照)。千虫譜は、初めて虫類を扱った図鑑として知られている [4]。

全世界で親しまれるファーブル昆虫記の第 1 巻 [14] は 1879 年に出版され、その続編が



画像出典：国立国会図書館デジタル化資料より

図 1.3: 画本虫えらみ

蜂と毛虫 (左上)、赤とんぼとイナゴ (右上)、
蓑虫とカブトムシ (左下)、蝸牛とクツワムシ (右下)

1907 年までに 9 巻出版された (全 10 巻)。ファーブル昆虫記は、昆虫の習性を調べるために行ったさまざまな実験の記録で構成されており、学習書としても有用であることが特徴である。

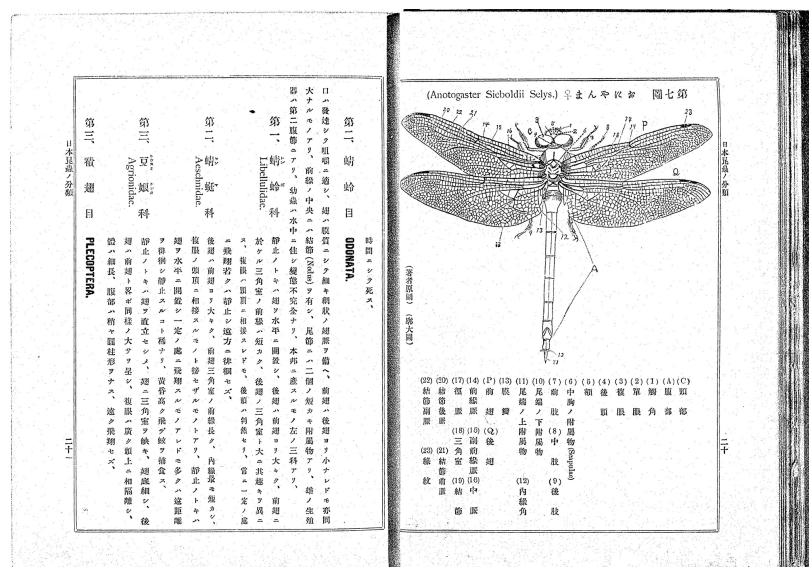
明治に出版された日本千虫図解 [15] は、日本の主要な昆虫の同定を主眼として昆虫の構造的な特徴を精密に描いたイラストと解説文で構成されている (図 1.5 参照)。昭和に入る



画像出典：国立国会図書館デジタル化資料より

図 1.4: 千虫譜

初めて虫類を扱った図鑑。いくつかの昆虫については雄・雌の特徴が図示されている。



画像出典：国立国会図書館デジタル化資料より

図 1.5: 日本千虫図解

昆虫の構造的な特徴を線で描いたイラストと解説文で構成されている。

と多色印刷技術の普及を背景に、昆虫の色彩的な特徴を表した本格的な昆虫図鑑が出版されるようになる [16]。戦後は特定の地域に生息する種を扱った昆虫図鑑 [17, 18, 19, 20]、頭部のみを扱った昆虫図鑑 [21]、昆虫の体、脚などの全てに箇所ピンツの合った合成写真を用いた図鑑 [22, 23, 24] など、趣向に富み、かつ芸術的な昆虫図鑑が出版されている。

昆虫図鑑は、昆虫の同定を行うために必要な資料であり、種の特徴をイラストと解説文で掲載した。また、対象を詳しく表すためにイラストは精密化・多色化され、後に写真を併用する構成に置き換わった。専門家のための図鑑や網羅的な図鑑から、近年は特定の範囲の種、または特定にコンセプトによる学習書としての特色をもった昆虫図鑑が多く出版されている。

1.1.2 デジタル図鑑

パーソナルコンピュータの普及により、紙を媒体とした図鑑から、マルチメディアを媒体としたデジタル図鑑が出版される。1990 年にソニー株式会社が発表した電子ブックプレイヤー「データディスクマン DD-1[25]」は、世界初の電子書籍専用端末と言われている [26]。データディスクマン DD-1 は、2.8 インチ モノクロ 2 階調液晶を搭載し、テキストの表示と音声データの再生が可能である。また、後方一致検索、複合検索といったデジタル化による機能拡張が特徴的である。2000 年に発表された後継機「データディスクマン DD-S35[27]」ではモノクロながらも写真・イラストの表示が可能である。バンドルされた岩波書店 国語辞典 広辞苑第 5 版は 2700 の図と、鳥の鳴き声が収録されている。

近年のデジタル図鑑は、コンピュータソフトウェア・携帯端末用ソフトウェアとして提供される百科辞典 [28]、植物図鑑 [29]、星座図鑑 [30] や、写真を切り替えて視点を変えられる元素図鑑 [31]、動画像を収録した生物図鑑 [32, 33] などがある。例えば携帯端末用ソフトウェア花しらべ [34] は、文字検索に加え、花の色、大きさ、花びらの枚数、形や、開花時期による検索や、花を撮影した写真から画像処理で花の名前を検索する機能を有している。88 星座図鑑 [30] は、携帯端末の位置情報と日時から、今いる場所から見える星座や流星群を検索することができる。また、従来紙媒体で提供していた図鑑コンテンツを Web 上で提供するサービス [35] や、図鑑を含む著作権保護対象外となった紙媒体の資料をデジタル化し Web 上で提供するサービス [36, 37] などがある。

デジタル化により、紙媒体による図鑑では扱うことができなかった検索機能、音声・動画像・CG などのマルチメディアの収録、携帯端末との連携が可能となった。今後はクラウドコンピューティングの発展・普及により、コンテンツの追加・更新や、関連情報へのリンク、ユーザーとのインタラクションなど、リアルタイムな情報システムとしての発展が期待できる。例えば、携帯端末のような非力なデバイスでは本来行うことが困難な計算コストの高い演算処理やグラフィックス・プロセッシング・ユニット (GPU) を必要とする高度な描画処理を、ネットワーク上の高性能サーバーが肩代わりすることで、携帯端末でこれらの処理を操作できる仕組みが既に発表されており [38]、デジタル図鑑への応用が期

待できる。

1.1.3 デジタル昆虫図鑑

昆虫図鑑においてもデジタル化が進み、Web 上で個人が公開する図鑑 [39, 40, 41, 42] や、公的機関、博物館、研究所などによって公開された図鑑 [43, 44, 45, 46, 47] などがある。個人や博物館、研究所による最新の研究成果や、地域の固有種を取りまとめ発信する仕組みはデジタル昆虫図鑑ならではの機能であると言える。

また、パソコン用ソフトウェア [48, 49, 50, 51, 52, 53] や、携帯ゲーム機用ソフトウェア [54] や携帯端末用ソフトウェア [55, 56, 57, 58] の形式をとる図鑑も発売されている。1995 年に発売されたマルチメディア昆虫図鑑 [48] は、イラスト、写真、解説文などの従来のコンテンツに加え動画像を収録したデジタル昆虫図鑑である。日本のコウチュウ図鑑 NEO for iPhone [59] は、収録された甲虫に対して、ユーザーが撮影した写真とコメント、日時、位置などの情報を観察記録として追加できるなど、携帯端末ならではの機能を有した図鑑と言える。これまでの写真、動画像による図鑑では、当然ながら昆虫を回転させて腹部を観察するといったことはできないが、The 3D 昆虫 [57] は 360 度から撮影した写真を切り替えて表示することで、昆虫を任意の方向に回転させて閲覧できる機能を実現した。巨虫図鑑 [58] は、昆虫の 3 次元形状モデルとテクスチャを用いることで回転させて閲覧したり、歩行や飛翔のアニメーションを閲覧することができる。

前述の通り、日本には 10 万種以上の昆虫が生息していると言われており、そのうち確認された個体は約 3 割り程度であると言われている。よって、新しい種の追加、更新を随時行えるようにするために、昆虫の画像と情報をデータベース (DB) 化して管理する試みが行われている [60, 61]。日本産ゾウムシデータベース [62] では画像検索、テキスト検索、採集記録、目録、生態写真などのコンテンツによって構成されている (図 1.6 参照)。今後は携帯端末と連携し、採集・観察記録の投稿を行う機能や、クラウドコンピューティングによる CG の活用、インタラクティブに扱える昆虫の 3D モデルコンテンツの充実化などの拡張が考えられる。

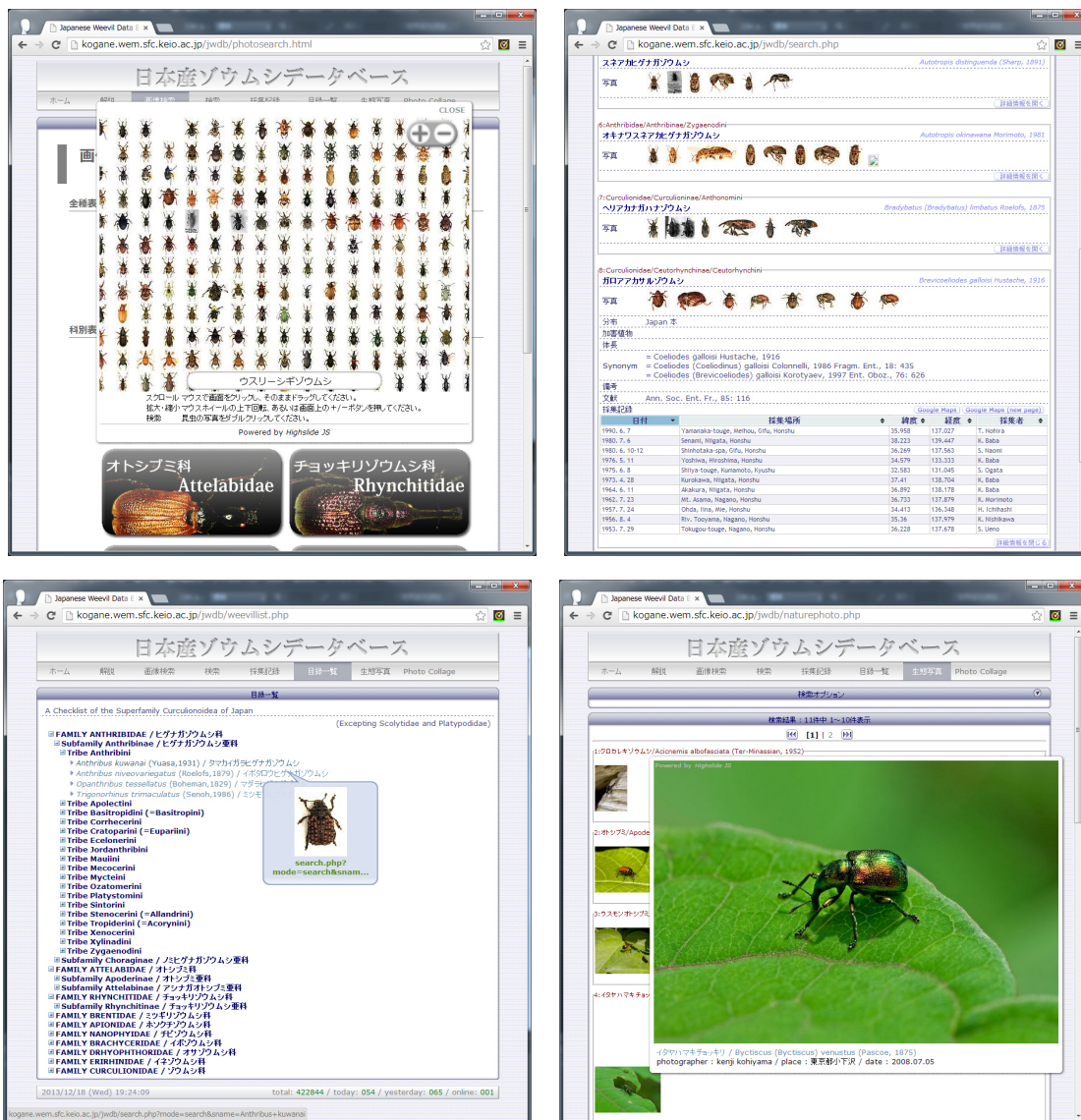


図 1.6: 日本産ゾウムシデータベース
画像検索 (左上)、テキスト検索と採集記録 (右上)、目録 (左下)、生態写真 (右下)

1.2 本研究の課題

図鑑の歴史から、大量データの取り扱いや検索機能などの利便性を向上させることを目的とした発展と、実物の特徴を詳細に記録することを目的とした発展の2つの要素がある。前者は、後方一致検索、複合検索などの文字検索機能の充実化や関連情報へのアクセスを可能としたリンク機能などが挙げられる。後者は、簡易なイラストから対象の特徴を精密に描いたイラストへの推移や、写真・印刷技術の普及による写真の掲載などから見て取れる。さらに、図 1.7 に示すように、紙媒体の図鑑からデジタル図鑑へ切り替わりにより、イラスト、写真、解説文に加え、動画像・CG などのマルチメディアの掲載が行われるなどの大きな発展を遂げた。現在は簡易な CG が利用されたデジタル図鑑がいくつか出版されているが、過去のイラストにおける精密化の推移からも、図 1.7 中の赤字で示すように、今後は詳細な CG が求められることが予想される。

詳細な CG を掲載することにより、子供、昆虫に親しみの少ない初心者に対しては、家庭・教室などの屋内から、花壇・畑といった屋外において啓蒙・学習を目的とした用途で、昆虫の研究者、農家など昆虫の知識を有したプロフィショナルには、研究室や農園にて同定を目的とした用途で有用性が期待できる。そこで本研究では、対象の特徴を詳細に取得し、CG として掲載する手法・技術について研究・開発を行うものとする。

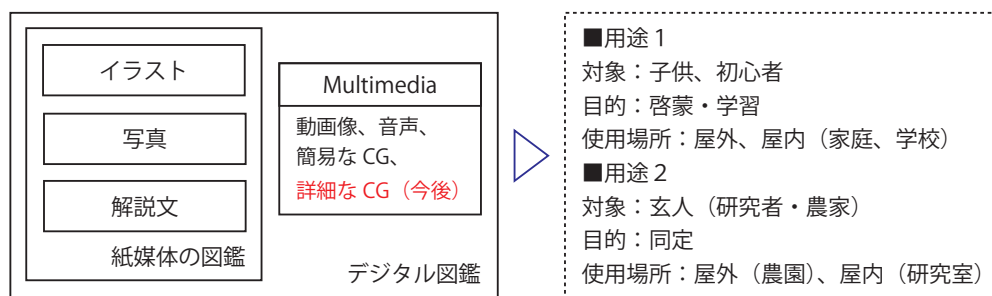


図 1.7: 図鑑の歴史と用途

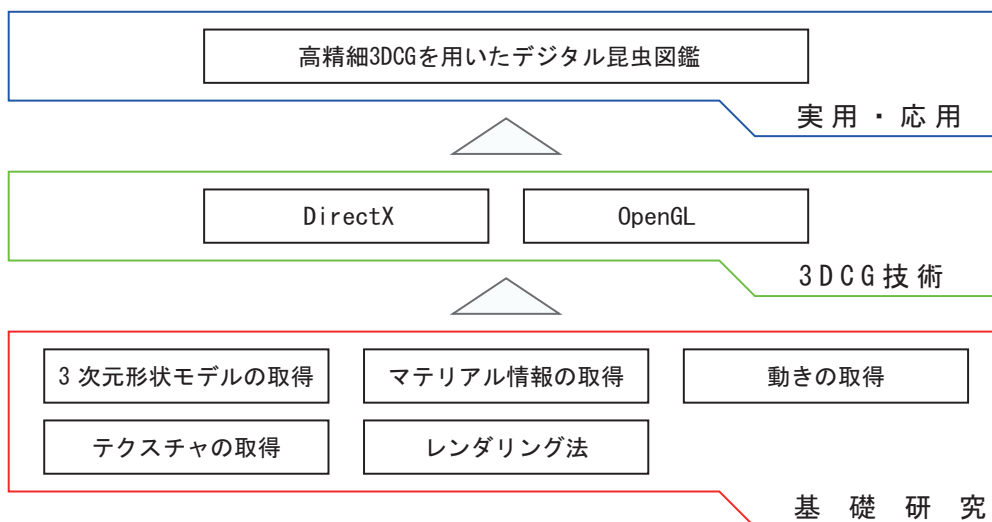


図 1.8: デジタル昆虫図鑑実現のための関連技術

実在物を対象とした図鑑の種類として、植物図鑑、動物図鑑、鉱物図鑑、昆虫図鑑、鉄道図鑑、航空機図鑑、人体図鑑などが存在する。中でも昆虫は、3次元形状の複雑さ、色合い・模様などのテクスチャの複雑さと種の多様性から最も難しい実在物であると言える。デジタル昆虫図鑑のための3DCGを作成するための技術を確立すれば、その技術は他分野への応用が十分に期待できると考えられる。このため、本論文は昆虫を対象とし、実測から昆虫の3次元形状モデル、テクスチャ、マテリアル情報、動きの取得法、およびマテリアル情報を考慮したレンダリング法について研究・開発を進める。

そして、実際にデジタル昆虫図鑑（図 1.8 中、青枠内）を作成し、博物館・科学館において展示を通し評価を行うことで、本研究の有効性を確認することができると考えられる。このため、本論文が実現した5つの基礎研究（図 1.8 中、赤枠内）によって取得した昆虫の3Dモデルを、既存のグラフィックス技術である DirectX¹、OpenGL²（図 1.8 中、緑枠内）を用いてデジタル昆虫図鑑を構築・実現する。

1.2.1 3次元形状モデルとテクスチャの取得

写真・動画像からでは、当然ながら撮影時の方向以外からの視覚情報を得ることはできない。そのため、目の前の名称が不明な昆虫と同じ角度に、図鑑に掲載された3DCGモデルを回転させることで見比べを行う、といった利用ができない。全方向からの昆虫の特徴をデジタル昆虫図鑑に収録し自由な方向からの閲覧を実現するためには、昆虫の3DCGモデル、すなわち3次元形状モデルとテクスチャは重要な構成要素と言える。昆虫の3DCG



図 1.9: 昆虫がもつ複雑な3次元形状の例
トゲ状の突起物を持つツシマヘリビロトゲハムシ（左）と、
コブ状の突起物をもつトゲイボゾウムシ（右）

¹Microsoft が開発したゲーム開発用のアプリケーション・プログラミング・インタフェース (API)。Windows OS, Xbox において、グラフィックボード、サウンドカード、キーボード、マウスなどのハードウェアデバイスの入出力を支援する仕組みを提供する。

²2D/3D グラフィックス処理のための API。クロスプラットフォームで動作可能。



図 1.10: 昆虫がもつ複雑なテクスチャの例
ウロコ状の模様を持つトゲアシクチプトゾウムシ (上) と、
細かい模様を持つユカタンビワハゴロモ (下)

モデルの掲載により、解説文が指す部位に 3DCG モデルを回転・拡大させるなどの利用が可能となり、特に入門者向け学習書として有用な機能の実現が期待できる。

これまでのデジタル昆虫図鑑には、CG クリエーターによって作成された昆虫の 3 次元形状モデルとテクスチャを使用したものがあるが、手作業による詳細部分の作り込みなど、作成コストの側面から多数の昆虫 3D モデルを作成することは難しいのが現状である。3D モデルを実物から計測して作成する手段として、X 線 CT や 3 次元画像計測法を用いることが考えられる。X 線 CT は、複雑な 3 次元形状であっても一度の計測で取得できるという利点があるが、テクスチャを所得できないため、昆虫の 3D モデル作成には利用できない。3 次元画像計測法は、一般に実物体の 3 次元形状とテクスチャの取得が可能であるが、昆虫に適用する場合、次の問題により 3 次元形状モデルとテクスチャの取得が困難となる。第 1 に、図 1.9 に示すように、昆虫は非常に複雑な 3 次元形状を有しており、手前の部位

が背後の部位を遮ることで観測不可となるオクルージョンの問題が発生する。第2に、図1.10に示すように、昆虫には非常に微細で複雑なテクスチャを有しているが、被写界深度の影響により全部位を詳細に観測することができない。デジタル昆虫図鑑の作成には、これらの問題を解決し、昆虫に特化した3次元形状モデルとテクスチャの取得を実現する手法が必要である。

1.2.2 マテリアル情報の取得

昆虫には透過や光沢、構造色など様々な質感の特徴を有するものがある。これらの特徴を詳細に取得し、図鑑に掲載するためにマテリアル情報の取得が必要である。マテリアル情報とは、一般に発光率、拡散率、光沢、反射率、鏡面反射率、透過率、屈折率、などで構成され、3Dモデル表面の質感設定に用いられるパラメータである。表1.1に各パラメータの説明を示す。

これまでのデジタル昆虫図鑑には、CGクリエイターによって作成されたマテリアルを使用したものがあるが、昆虫は体の部位ごとで異なった複雑なマテリアル情報を有しているため、これらを手作業で作成することは非常に困難である。例えば昆虫には図1.11に示すように、部位ごとに異なった透過率かつ背景を拡散するようなマテリアル情報や、光沢、反射、鏡面反射、見る角度と光源の波長で反射光が異なる構造色と呼ばれる特殊なマテリアル情報を有している。これら昆虫のマテリアル情報を忠実に再現したCGモデルを手作業で作成することは実質不可能なため、昆虫に特化したマテリアル情報の実計測法が必要である。

表 1.1: マテリアルの種類

名称	説明
発光率	マテリアルそのものの発光の度合い
拡散率	光が物質に衝突した際の拡散の度合い
光沢	ハイライトのぼかしの度合い
反射率	光源によるハイライトの度合い
鏡面反射率	反射による映り込みの度合い
透過率	光を透過する度合い
屈折率	光が屈折する度合い

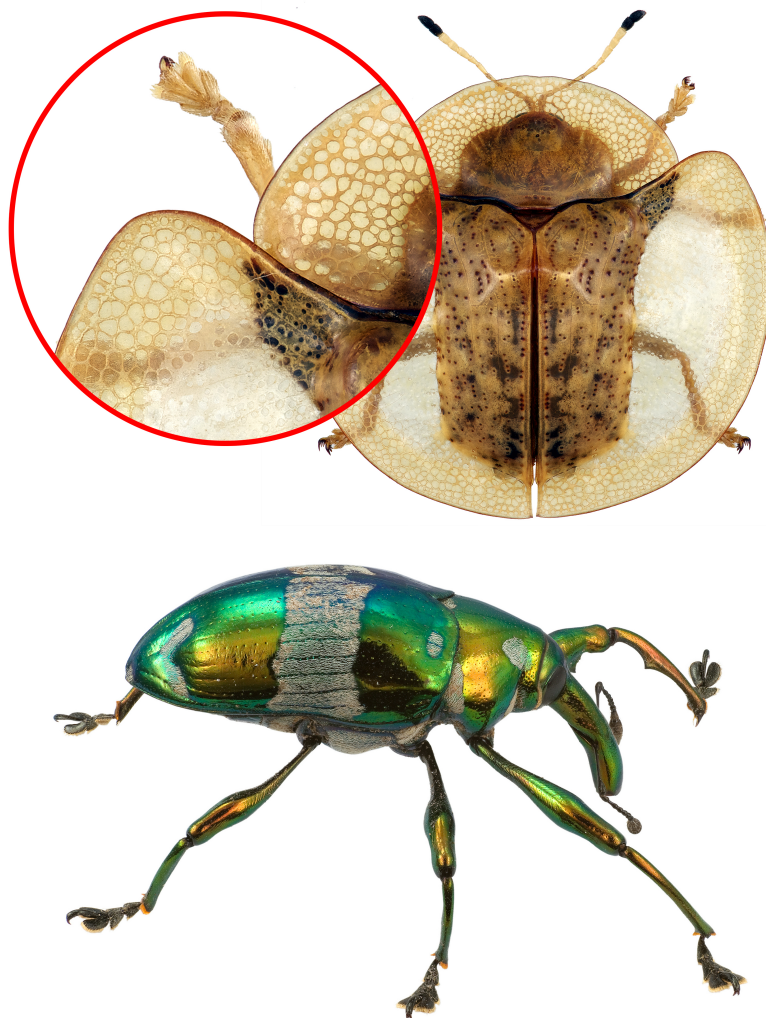


図 1.11: 昆虫がもつマテリアルの例

部位ごとに透過率、拡散率が異なったマテリアル情報を持つウスモンジンガサハムシ（上）と、
光沢、反射率、鏡面反射率に加え、見る角度、光源の波長で反射光が異なる
構造色と呼ばれる特殊なマテリアル情報を持つニジイロアシナガゾウムシ（下）

1.2.3 動きの取得

昆虫の特徴として、歩行、飛翔、捕食、威嚇、警戒、求愛などの動きに関する情報が挙げられる。これらの特徴を取得しデジタル昆虫図鑑に掲載する手法が必要である。

これまでのデジタル昆虫図鑑には、CG クリエーターによって作成されたアニメーションを使用したものがあるが、自然な動きを作りこむには膨大な労力と時間が必要となる。人間の動きを取得し CG モデルに適用する手法として、モーションキャプチャーが有名である。この手法は通常は人間用に設計されており、これを昆虫に適用することは考えられていない。CG クリエーターの手作業に頼らずに、自然環境下における昆虫の自然な動きから CG モデルにアニメーションを適用し図鑑に掲載するためには、昆虫の動きの取得に関した一連の手法を確立する必要がある。

1.3 本研究の目的と進め方

昆虫の3次元形状モデルとテクスチャ、マテリアル情報、動きの取得法を確立し、デジタル昆虫図鑑のための高精細3DCG作成技術を構築することが本研究の目的である。

3次元形状モデルとテクスチャの取得では、昆虫の複雑な3次元形状によるオクルージョンの解決と、被写界深度の影響に関わらずテクスチャを精細に取得する方法の開発、といった課題がある。マテリアル情報の取得では、透過率、拡散率、光沢、反射率、鏡面反射率、構造色などのマテリアルが昆虫の体の部位ごとで異なるため、これらをいかに計測するかといった課題がある。動きの取得では、計測から動きを取得するモーションキャプチャーは一般に人間用に設計されており、そのまま昆虫へ適用することは困難であるため、昆虫の動きをいかに実計測から取得するかといった課題がある。本論文では、これらの課題を解決し、図1.12に示すデジタル昆虫図鑑のための技術を確立する。

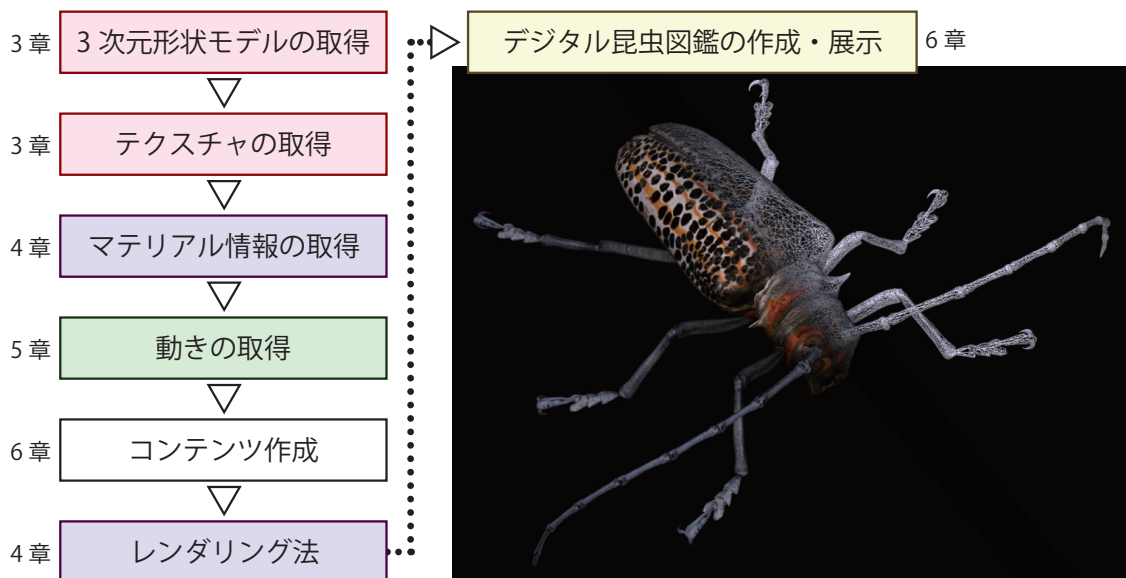


図 1.12: デジタル昆虫図鑑作成のためのフレームワーク

本論文では、昆虫の3次元形状モデルとテクスチャを取得するために、スリット型光源を用いた3次元形状の計測法、および計測装置の研究・開発を行った[63]。本計測法は、厚さ数mmの光の平面を生成するスリット型光源を開発し、フォーカスエリアのみを観察することで3次元形状モデルを取得し、複数回の計測によりオクルージョンの問題を解決した。またピントの合っている領域のみを合成することですべての領域にピントの合ったテクスチャの取得を実現した。これらの技術を用いて3次元形状モデルの取得、およびテクスチャの取得を行う。

次に昆虫のマテリアル情報として、透過率、拡散率を実計測から取得するために、透過・拡散モデルの構築と計測法、レンダリング法の研究を行った[64]。本計測法を用いることで、マテリアル情報の取得の課題であった、透過率、拡散率の取得を実現した。この技術

をマテリアル情報の取得、およびマテリアル情報を考慮したレンダリング法で使用する。

最後に、自然界における昆虫の自然な動きを取得するために、生態動画像に対し簡易モーションキャプチャーを適用する手法について研究を行った [65]。モーションキャプチャー技術を昆虫に適用するために、簡易モーションキャプチャーシステムの構築を行い、自然環境下における昆虫の動きの実計測を実現した。

1.4 本論文の構成

本論文の構成は次の通りである。第2章では関連研究として、3次元形状モデルとテクスチャの取得、マテリアル情報(透過)の取得、動きの取得に関する先行研究を整理する。第3章では、昆虫の3次元形状モデルとテクスチャを取得するために研究・開発したスリット型光源を用いた計測法について述べる。第4章では、昆虫のマテリアルである透過率、拡散率を取得するための透過・拡散モデルの構築と計測法、レンダリング法を述べる。第5章では、自然環境下における昆虫の自然な動作を取得するためのモーションキャプチャシステムについて述べる。第6章では、実現した技術を用いて、昆虫の3DCGモデルを作成する手順、および作成したデジタル昆虫図鑑を実際に博物館に展示するにあたり開発したシステムと、それを生物、工業・製造業に応用したシステムについて述べる。第7章において、本論文の技術が寄与することで開かれる未来の図鑑について述べる。第8章で、本論文の結論、今後の課題を述べる。

第 2 章

関連研究

本章は、デジタル昆虫図鑑と、3次元形状モデル、テクスチャ、マテリアル情報、動きの取得を含む3Dモデル作成に関連した研究を示す。

2.1 デジタル昆虫図鑑

前述の通り、デジタル昆虫図鑑には、動画像を用いたもの、多視点の写真を切り替えて表示することで昆虫を回転させて閲覧できるものなCGを用いたものなどがある。本節では、これらの関連するデジタル昆虫図鑑について述べる。

2.1.1 動画像を用いたデジタル昆虫図鑑

マルチメディア昆虫図鑑[48]は、600種の昆虫とその動画像44本が収録された図鑑である。1995年に出版された初期のデジタル昆虫図鑑でありながら、検索等の機能も充実している。詳細な解説と生態写真に加え、昆虫が生息地においてどのような行動をしているかを動画像を見て知ることができる貴重な資料と言える。動画像を用いた図鑑としては、他に、学研マルチメディア図鑑・昆虫[51]などがある。これらのデジタル昆虫図鑑は、昆虫の生態を動画像として収録することで従来の図鑑では表すことのできなかった時系列の情報を付加することに成功した。これは大変重要な貢献ではあるが、当然ながら撮影していない方向からの昆虫の観察は行えない。

2.1.2 多視点の写真から、昆虫を回転して閲覧できるデジタル昆虫図鑑

The 3D 昆虫 - カブトムシ・クワガタムシ編[57]は、自動多角度撮影システム[66]によって取得された昆虫の多角度写真群をユーザーからの入力によって切り替えることで、昆虫の回転表示を実現した図鑑である。動画像を用いたデジタル昆虫図鑑では見るのことができなかった昆虫の腹部なども見ることができる、画期的な図鑑である。しかしながら、The 3D 昆虫 - カブトムシ・クワガタムシ編は写真で構築しているため、当然ながら歩行や飛翔などの写真撮影を行っていない動作などの3Dアニメーションを行うことはできない。

2.1.3 CGを用いたデジタル昆虫図鑑

巨虫図鑑[58]は、CGクリエイターによって作成された昆虫の3Dモデルを用いた図鑑である。CGを用いることで昆虫を回転させて閲覧、また歩行や飛翔、捕食などの昆虫の特徴を捉えた動きを閲覧することができる。CGを利用した画期的な図鑑と言える。しかしながら、昆虫の3Dモデルを手動で作成するには膨大な労力と時間を要するため、3Dモデルの大量作成が難しい、細かい作り込みが制作費からみて困難であるといった問題がある。

2.2 3次元形状モデル、テクスチャ取得に関する研究

実世界の物体を計測することで3次元形状モデルを取得する方法を次に示す。また、これらの3次元形状計測法について、取得精度、テクスチャの取得の可否を表2.1に示す。

2.2.1 接触式プローブを用いた方式

接触式プローブを計測対象の外郭を這わせるようにして3次元形状モデルを取得する[67]。計測精度が非常に高いため、主に製造業におけるリバースエンジニアリング等で用いられることが多い。ただし、3次元形状の入り組んだ対象、奥まった形状を持つ対称を計測することはできない。また対象のテクスチャの取得もできない。このため、昆虫の3Dモデル作成には利用できない。

2.2.2 パターン投影法

計測対象に既知のパターンを投影し、その歪みを観察することで3次元形状モデルを取得する[68]。形状計測後に、同装置にてパターン光を照射せずに、再度写真を取り直すことでテクスチャを取得することも可能。接写撮影時は、被写界深度の影響により観察できるパターンの領域が非常に狭い範囲に制限されるため、パターン投影法の利用は困難である。昆虫のテクスチャの取得には、接写撮影が必要なため、昆虫の3Dモデル作成には利用できない。

2.2.3 共焦点法

対物レンズ側と撮像素子側の焦点位置にピンホールを設置し、焦点領域のみを観察する手法[69]。原理的には一点観測のため、3次元の形状計測には、 $X \cdot Y \cdot Z$ 軸に移動させながら観察する必要がある。波長により焦点位置が異なるため一般にテクスチャの取得はできないが、別途テクスチャ取得用の光路を設けて取得する装置もある。主に顕微鏡に用いられる手法で、組織や細胞の観察に用いられる。昆虫の大きさは数mm～数cmであり、共焦点法で3Dモデルを作成することは難しい。

2.2.4 ステレオ法

計測対象の複数カメラ間における対応点に対して、カメラの拘束条件から3次元形状モデルを取得する[70]。テクスチャの取得も可能であるが、誤差を多く含むため計測精度は低い。また接写撮影時は、被写界深度の影響によりカメラ間の対応点を観察することが難しいため、昆虫の3Dモデル作成には利用できない。

2.2.5 Depth from Focus 法

接写撮影時における被写界深度によるボケの量を利用し、焦点領域から奥行きを推定する手法 [67] [71]。3次元形状モデルとテクスチャの取得が可能であるが、誤差を多く含むため残念ながら計測精度は低い。このため、昆虫の3Dモデル作成には利用できない。

2.2.6 X線CT法

X線を照射しながら計測対象を回転させ、その透過量から3次元形状モデルを計測する [72, 73]。精度が高く、一度の計測で内部構造を含む形状計測が可能であるが、テクスチャの取得はできない。このため、昆虫の3Dモデル作成には利用できない。

表 2.1: 主要な3次元形状計測法

	取得精度	テクスチャの取得*	対象サイズ**
接触式	高	×	中
パターン投影法	高		中
共焦点法	高	×	微小
ステレオ法	中		中・大
Depth from Focus 法	中		小・中
X線CT法	高	×	小・中

*テクスチャの取得、×: 取得不可、: 取得可

**対象サイズ、微小: 組織、細胞など、小: 昆虫など、
中: 車、エンジンなど、大: ビルや橋などの建築物

2.3 マテリアル(透過・拡散)の取得に関する研究

次に、昆虫のマテリアルとして透過・拡散の情報を取得する既存研究を示す。

2.3.1 同一の物質からなる物体に対して透過・屈折率を推定する手法

同一の物質によって対象物体が構成されていると仮定し、実画像から透過・屈折率を取得する方法が提案されている [74]。対象が同一の物質で構成されている場合、大変有効な手法ではあるが、昆虫は同一の物質で構成されておらず体の部位ごとにマテリアル情報が異なる。そのため、この手法をそのまま昆虫に適用して画素ごとのマテリアル情報を取得することはできない。

2.3.2 人間の視覚心理から反射・透過を再現する手法

物理的に再現するのではなく、人間の視覚心理から反射・透過を再現した手法も提案されている [75]。この手法は対象は同一の物質で構成されている必要はないため、昆虫への応用が期待できるが、接写撮影時の被写界深度の影響があるため、そのまま適用することはできない。

2.3.3 透過率・屈折率・白濁度を計測する手法

先行研究として多数の光源を配置することでさまざまな照明条件下において透過率・屈折率・白濁度を計測する手法も提案されている [76]。この手法が扱う物体の白濁度と屈折率によって表現されたぼけ現象は比較的遠距離にある背景像をぼかすための要素であり、昆虫の翅・体と背景像との近傍におけるぼかし現象とは異なった現象である。

2.3.4 Henyey-Greenstein 散乱モデルを推定する手法

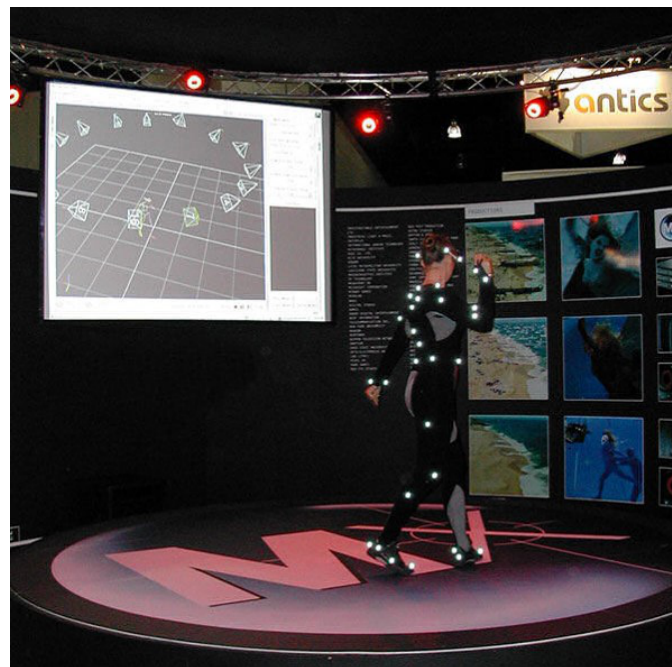
霧などの水の粒子によって引き起こされる Henyey-Greenstein 散乱のぼけ関数を推定している手法が提案されている [77]。主に大気表現を目的として屈折からぼかし現象を再現する手法であり、昆虫への適用は難しい。

2.4 動きの取得に関する研究

最後に動きの取得に関する研究を示す。実世界での動きを取得する方法は、2次元の動画像から動きをトレースして2次元のアニメーションを作成するロトスコープ [78] や、3次元的な動きを時系列で取得するモーションキャプチャーが知られている。取得されたデータは、スポーツ選手の動きの解析、ゲーム・映画などにおけるキャラクターのアニメーションなどに用いられる。モーションキャプチャーには、人間をターゲットにした次の4方式と、昆虫を対象にした手法が提案されている。

2.4.1 光学式モーションキャプチャーシステム

対象の主要部位・関節にマーカーを取り付け、複数台配置されたカメラで捕らえたマーカーの位置から、3次元座標を取得する方式 (図 2.1 参照)。光を反射する素材をマーカーに用いるパッシブ光学式と、LED などの発光物をマーカーに用いるアクティブ型 [79] がある。また、パッシブ光学式ではマーカーを認識するために特殊な照明環境を必要とするのが一般的であるが、最近では自然光のもとで取得を行える方式も提案されている [80]。光学式モーションキャプチャーシステムは、カメラを設置した撮影空間内にあるマーカーの3次元座標を測定する。同時に複数のマーカーを測定できるが、当然ながら物体がマーカーの前を遮ると計測できない。昆虫は人間に比べると小型であるため、高精度な測定を行おうとした場合、カメラを設置する空間が狭くなる。そのため、自然環境下で自由かつ高速に動きまわる昆虫の動きを光学式モーションキャプチャーシステムで取得することは難しい。



画像出典：Wikipedia より

図 2.1: 光学式モーションキャプチャーシステムの例

2.4.2 機械式モーションキャプチャシステム

関節に直接センサーを取り付けて、人間の3次元的な動きを時系列で取得するシステム。センサーには、一般に角速度センサーや加速度センサーが用いられる [81]。カメラを用いないため、遮蔽物によりマーカースを見失うことが無い、空間を制限されずに動きを取得できるといった利点があるが、装置が大掛かりになる、関節に取り付けるセンサーの重量も重い、センサーの可動域を超える動きは制限される、といった不利点がある。昆虫に適用するには、昆虫の関節用に開発されたセンサーが必要であるが、現状では存在しない。

2.4.3 磁気式モーションキャプチャシステム

関節に直接磁気コイルを取り付けて、計測空間中の人間の3次元的な動きを時系列で取得するシステム [82]。磁界の変化を測定し動きを取得するため、磁界の外での動きは計測できない。そのため、自然環境下で自由かつ高速に動きまわる昆虫の動きを光学式モーションキャプチャシステムで取得することは難しい。

2.4.4 機械学習によるマーカースレスモーションキャプチャシステム

カメラで撮影した画像から、人間の頭や体、手足を認識し、その動きを取得するシステム [83]。大量に取得した人間の画像から機械学習により指定を推定する方法などがある。人間と異なり、昆虫は種の中でも姿形にバリエーションが富んでいるため、機械学習によるマーカースレスモーションキャプチャシステムの適用は難しい。

2.4.5 昆虫を対象にしたマーカースレスモーションキャプチャシステム

複数台の同期したカメラを用意し、それらの3次元空間中の位置を求めておき、昆虫の動きを取得するシステムが提案されている [84]。また、事前に昆虫の3DCGモデルを作成しておき、複数台のカメラで撮影した画像から、3DCGモデルに動きを割り当て、動きを取得するシステムも提案されている [85]。いずれの手法もマーカースが不要であり、昆虫に対し有効な手法ではあるが、自然環境下においては複数台からなるカメラシステムで昆虫を追従して撮影することは難しいといった問題がある。

第 3 章

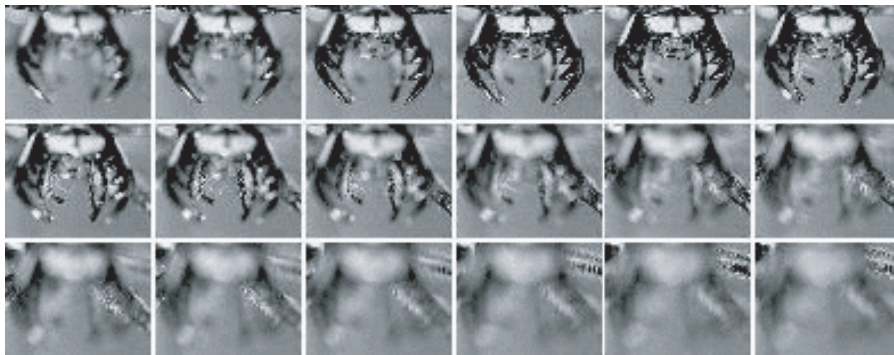
3次元形状モデル、テクスチャの取得法

3.1 はじめに

実画像から 3 次元形状モデルとテクスチャを取得する方法として、フォーカスエリアの位置を移動しながら撮影した複数枚の画像から、各画素ごとに合焦位置を探索する Depth from Focus[86, 71, 87, 88, 89, 90] や、フォーカスエリアの位置によって生じるボケの振る舞いを解析することで奥行き情報を求める Depth from Defocus[91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98] の研究が行われている。これらの手法による 3 次元画像計測の一般的な手順を下記、および図 3.1 に示す。

1. カメラのフォーカスエリア位置を移動しながら被写体を撮影し、複数枚の画像を取得する。
2. 取得された複数枚の画像から各画素ごとの焦点位置を推定し、テクスチャと画素の奥行き情報を輝度値とした Depth 画像を取得する。
3. Depth 画像を用いて 3 次元形状モデルを生成する。

1. 画像の取得



2. テクスチャとDepth画像の取得

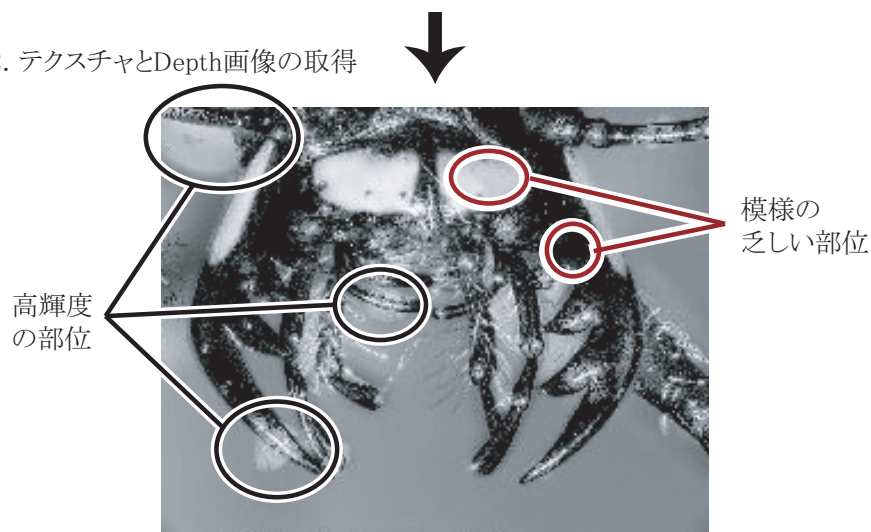


図 3.1: 一般的な手順と高輝度部位のボケによる影響

これらの処理の中核は項目 2 であり、輝度値による推定法や、ボケ関数による合焦点推定法 [89]、選択式統合法 [99] など数種類の手法が提案されている（図 3.1 は輝度値による焦点合成法の一例である）。

一般にボケはガウス関数で近似可能であるとされており、いずれの手法も画素の輝度値を解析することにより色・奥行き情報の推定を行っている。しかしながら、照明光や太陽光などが強く反射したような極めて高輝度な部位のボケに関しては、その部位のボケの度合いが進むにつれガウス関数では近似できなくなり、輝度値を用いた手法やボケ関数による合焦点推定法では高輝度の部位のエッジが合焦点と誤判定されてしまうといった問題がある。

これに対し選択式統合法では、完全ではないもののこの問題を回避することができる。この手法は意図的に画像をぼかすことを通して合焦点の個所の判定を行うもので、比較する 2 枚の画像間に適度なボケの差が存在することが必要となる。しかしながら、高精度の 3 次元画像計測を目的とした撮影では、フォーカスなどを微小に変化させつつ大量の画像を取得するため、各画像間におけるボケの差は極めて小さくなり、選択式統合法をそのまま適用することはできない。

また、いずれの手法も、模様が乏しい被写体に対しては、テクスチャの取得が可能であっても、3 次元形状モデルの取得が困難となる（図 3.1 参照）。模様が乏しい部位については、フォーカスエリア位置によるボケの変化を観測することが難しいが、その反面、色の变化も乏しいため、どの奥行き距離にある輝度値を選択しても最終的に取得されるテクスチャへの影響は少ない。そのため、一見すべての画素にピントがあっているかのようなテクスチャは取得できるが、3 次元形状モデルの取得はできない。

そこで我々は注目点の合焦位置近傍における輝度値の振る舞いを詳細に調べると共に、周囲のぼけによる影響を極力抑えた手法としてスリット型光源を用いた 3 次元形状モデルとテクスチャの取得法を提案し、SIGGRAPH2001 Emerging Technologies においてデモンストレーション [100] を実施した。本章ではこれらの研究成果を基に、3 次元形状モデルとテクスチャの取得を同一のシステムで実現する取得法の研究、および取得装置の開発を行う。これにより 3 次元形状モデルとテクスチャの位置の対応関係を一切損なうことなく、対象の 3DCG モデルを構築することができる。

3.2 レンズモデル

はじめにカメラにおける薄凸レンズモデル、透視投影、ボケモデルを定義する。

3.2.1 薄凸レンズモデル

カメラは薄凸レンズモデルのレンズを有すものとする。カメラは焦点距離 f を固定とし、

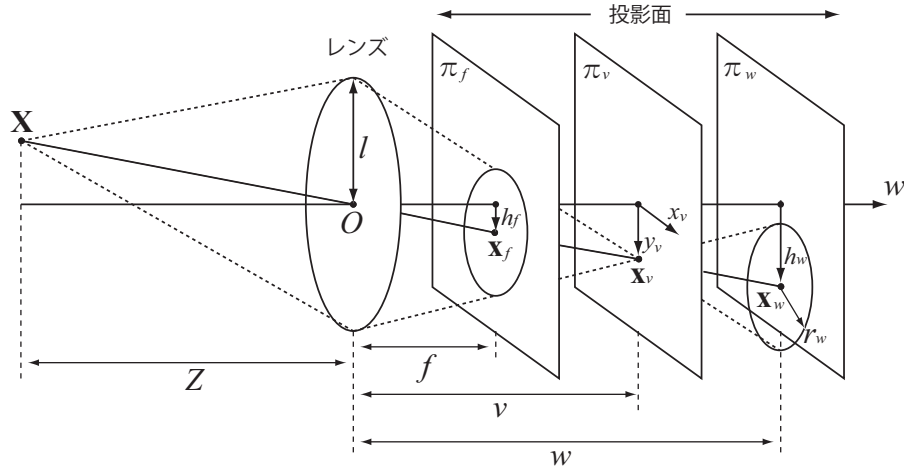


図 3.2: 薄凸レンズモデル

1 枚の円形開口薄凸レンズを持つ薄凸レンズモデルであるとし（図 3.2 参照）、焦点距離 f 、レンズの主点 O から物体までの距離 Z 、合焦位置 v にはレンズの公式 3.1 が成立するものとする。

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{Z} + \frac{1}{v} \quad (3.1)$$

レンズの主点 O を通り、投影面 π の原点を垂直に通る直線を光軸と呼ぶ。フォーカスの調節は、投影面 π を光軸上で前後に移動させて行う。

3 次元空間中に点 $\mathbf{X} = [X, Y, Z]^T$ があるとき、点 \mathbf{X} の像はカメラの投影面 π が焦点距離 f 以上にあるときから得られ、合焦位置 v においてボケのない合焦画像が得られる。投影面 π の光軸上の位置をフォーカス位置と呼ぶ。図 3.2 に示すように、投影面 π 上に光軸との交点を原点とした xy 座標系を定義する。

3.2.2 透視投影

図 3.2 から明らかなように、3 次元空間中の点 \mathbf{X} と、焦点距離 f に置かれた投影面 π_f 上に投影された点 \mathbf{X} の投影点 $x_f = [x_f, y_f]^T$ には、透視投影 3.2 の関係がある。

$$x_f = \frac{X}{Z}f, \quad y_f = \frac{Y}{Z}f. \quad (3.2)$$

同様に、点 \mathbf{X} と $x_v = [x_v, y_v]^T, x_w = [x_w, y_w]^T$ にはそれぞれ次の関係がある。

$$x_v = \frac{X}{Z}v, \quad y_v = \frac{Y}{Z}v, \quad x_w = \frac{X}{Z}w, \quad y_w = \frac{Y}{Z}w. \quad (3.3)$$

3.2.3 ボケモデル

投影点 \mathbf{x} の輝度値を $I(\mathbf{x})$ で表すとする。3 次元空間中に n 点の点 \mathbf{X}_i が存在し、フォーカス位置 f, v, w における \mathbf{X}_i の投影点を $\mathbf{x}_{fi}, \mathbf{x}_{vi}, \mathbf{x}_{wi}$ とするとき、周囲のボケを考慮した π_w 上の任意の点 \mathbf{x}_{wi} の輝度値は一般に 2 次元ガウス分布を用いて次のようにモデル化することが出来る。

$$I(\mathbf{x}_{wi}) = \sum_{j=1}^n \mathbf{x}_{wi} \cdot I(r_w, t_{ij}), \quad (3.4)$$

$$I(r_w, t_{ij}) = \frac{1}{2\pi r_w^2} e^{-\frac{t_{ij}^2}{2r_w^2}}, \quad (3.5)$$

$$t_{ij} = \|\mathbf{x}_{wi} - \mathbf{x}_{wj}\|. \quad (3.6)$$

図 2 から明らかなように、ボケの広がり半径 r_w は合焦位置 v と投影面 p_w のフォーカス位置 w で決まり、レンズの開口半径 l を用いて次のように表される。

$$r_w = \frac{l|w - v|}{v}. \quad (3.7)$$

3.3 スリット型光源を用いた3次元形状モデルとテクスチャの取得法

3次元形状モデルとテクスチャを取得するために、まずは注目点の合焦位置近傍における輝度値の振る舞いを数値シミュレーションから明らかにする。次にボケの影響を排除するためのスリット型光源を用いた取得法を提案し、実験から本手法の有効性を示す。

3.3.1 理想照明による数値シミュレーション

輝度値 $I(\mathbf{X}) = I(\mathbf{x}v)$ となるような理想的な照明条件のもと、ボケによる輝度値の変化の振る舞いを数値シミュレーションから明らかにする。次の2種類の点群 $pattern_a, pattern_b$ (図 3.3 参照) について、注目点 \mathbf{x}_{w33} の輝度値の変化を図 3.4 示す。 i, j はそれぞれ 1.5 の値をとり、 $d = 0.5$ とする。投影面 π_w は \mathbf{X}_{33} の距離 Z が 10 であるとき合焦距離となるように配置されている。 \mathbf{X}_{33} の初期位置 Z_S は 9.8 であり、 $\Delta Z = 0.01$ 間隔で点群を移動させるものとする。ここで $m[index]$ は画像の枚数目を表し 0 から 39 の値をとる。

図 3.4 に示す $\Delta\gamma_{44}$ は $pattern_b$ において点 \mathbf{X}_{33} に及ぼす点 \mathbf{X}_{44} のボケ成分である。 $pattern_a$ のような場合では、 \mathbf{X}_{33} の奥行き情報 Z は輝度値が最小となる箇所として判断することが出来る。一方 $pattern_b$ のような場合では、 \mathbf{X}_{33} の奥行き情報 Z は輝度値が最小となる箇所として判断することが出来ない。これは注目点の周囲に点 \mathbf{X}_{44} のような合焦位置が異なり、かつ高輝度の点が存在する場合、 $\Delta\gamma_{44}$ のように注目点の輝度値に多大な影響を及ぼすからである。

このことは例えば実際に昆虫などのように微小で複雑な物体を撮影した場合、図 3.5 のようなまったくばらばらな輝度値の変化を引き起こす原因となっていると考えられる。

3.3.2 スリット型光源を用いた数値シミュレーション

単純な3次元形状を持った被写体に対しては奥行き情報 Z を計算できる可能性があるが、複雑な3次元形状を有した被写体に対してはシミュレーション結果より奥行き情報 Z を推定することは現実問題として困難である。そこで本研究では、撮影の時点において周囲のボケによる影響を極力除去したスリット型光源を用いた手法を提案する。

図 3.6 に示すように、投影面 π_v と光の平面 Π_L を平行に固定し、さらに Π_L 上の点 \mathbf{X} が合焦点となるように投影面を $w = v$ に固定する。そして CT スキャンの要領で被写体を移動させながら撮影することで常にフォーカスの合った点のみが取得できるといった仕組みである。このとき、各画像上の合焦点の奥行き情報は被写体の移動量と画像の撮影枚数目の積から求めることができる。スリット光は奥行き Z に関するガウス分布として次のようにモデル化することができる。

$$I(x_{vi}) = I(\mathbf{X}) \cdot G(s, Z), \quad (3.8)$$

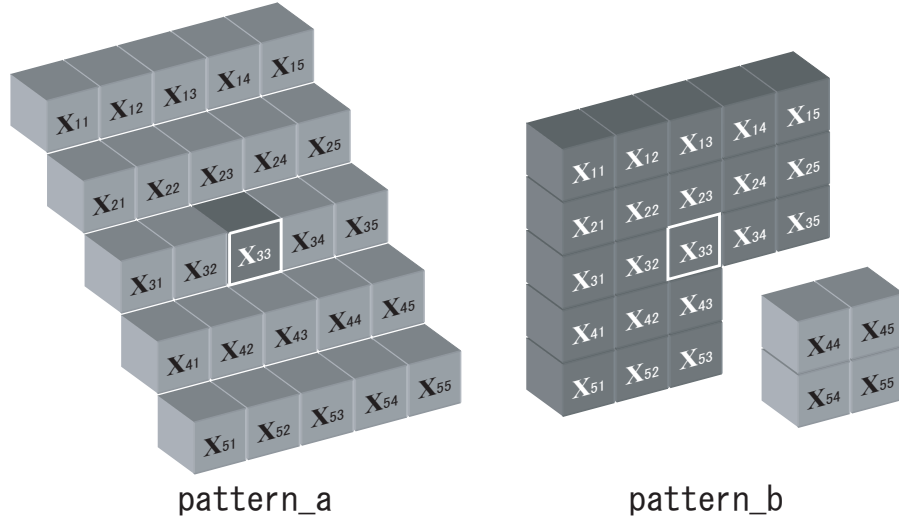


図 3.3: シミュレーション用のサンプル

pattern_a

$$\mathbf{X}_{ij} = \begin{bmatrix} d(i-3) \\ d(j-3) \\ 10 - d(j-3) + Z_S + \Delta Z \cdot m \end{bmatrix},$$

$$I(\mathbf{X}_{ij}) = \begin{cases} 32, & \text{if } (i=3 \text{ and } j=3) \\ 96, & \text{else.} \end{cases}$$

pattern_b

$$\mathbf{X}_{ij} = \begin{bmatrix} d(i-3) \\ d(j-3) \\ 10 - 2b + Z_S + \Delta Z \cdot m \end{bmatrix},$$

$$b = \begin{cases} d, & \text{if } (i>3 \text{ and } j>3) \\ 0, & \text{else.} \end{cases},$$

$$I(\mathbf{X}_{ij}) = \begin{cases} 96, & \text{if } (i>3 \text{ and } j>3) \\ 32, & \text{else.} \end{cases}$$

適当なスリット幅として移動量の2倍の $s = 0.02$ としたときの $pattern_a$, $pattern_b$ の輝度値の変化を図 3.7 に示す。図 3.7 より明らかなように、 $pattern_a$ 、 $pattern_b$ どちらにおいても正確な奥行き情報を得られることがわかる。

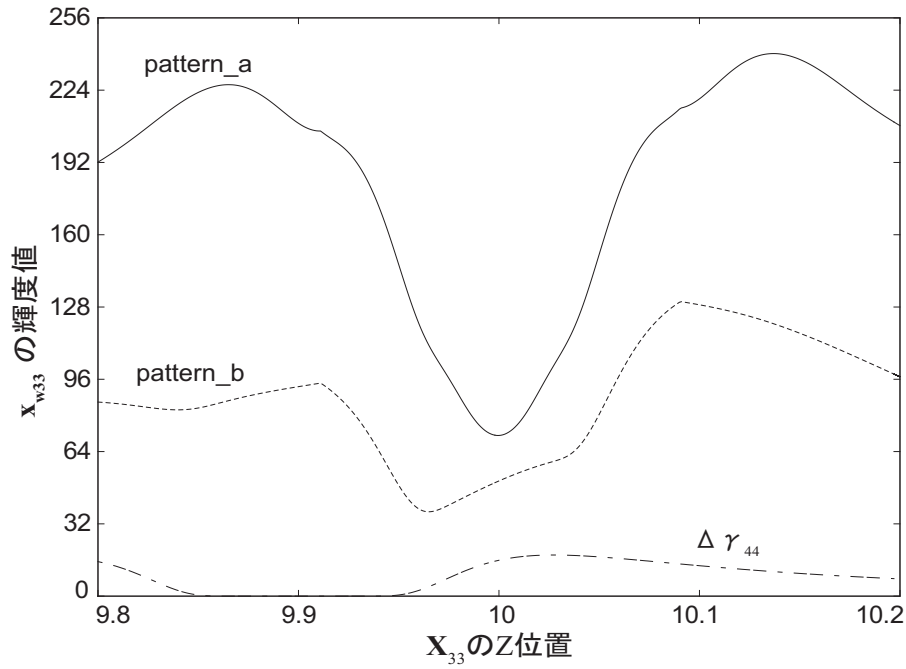


図 3.4: シミュレーション結果

3.3.3 スリット幅と分解能についての検証

以上の数値シミュレーションより、スリット型光源を用いることで3次元形状モデルとテクスチャを正確に取得することが可能であることが示された。実際に試作したスリット型光源を用いて、スリット幅 $s = 0.01, 0.05, 0.1[mm]$ のスリット光を用いた場合、取得可能な色情報と奥行き情報の分解能について実験・検証する。ここで奥行き情報の分解能とはスライダーの移動間隔を意味する。実験では図 3.8 に示す物体を移動間隔 $\Delta Z = 0.05, 0.10, 0.20, 0.50[mm]$ でそれぞれ撮影を行う。ただし $s = 100[mm]$ についてのみ奥行き情報 $\Delta Z = 0.75[mm]$ も検証する。

奥行き情報についての分解能の検証

各スリット光を使用してある一点の輝度値の変化について注目したとき、それぞれの移動間隔において得られたデータを図 3.9 に示す。

図 3.9 より、 $s = 0.01[mm]$ では $\Delta Z = 0.2[mm]$ 以上においては移動量が大きいため、奥行き情報を正しく取得できない可能性がある。同様に $s = 0.05[mm]$ においては $\Delta Z = 0.5[mm]$ 、 $s = 0.1[mm]$ においては $\Delta Z = 0.75[mm]$ 以上から奥行き情報を正しく取得することができない。

色情報についての分解能の検証

各スリット光を使用し、それぞれの移動間隔において撮影された複数枚の画像から生成されたテクスチャを表 3.1 に示す。

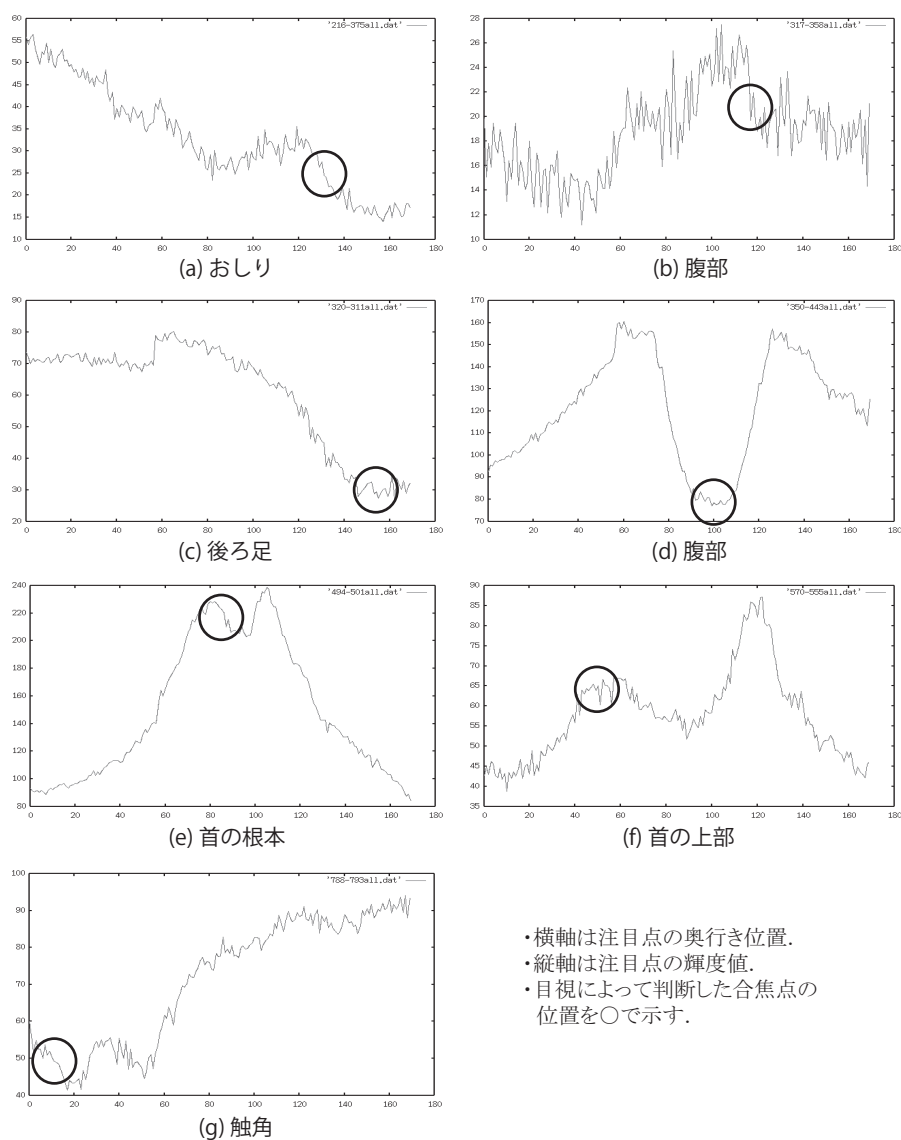


図 3.5: 実際の輝度値の変化（昆虫を撮影）

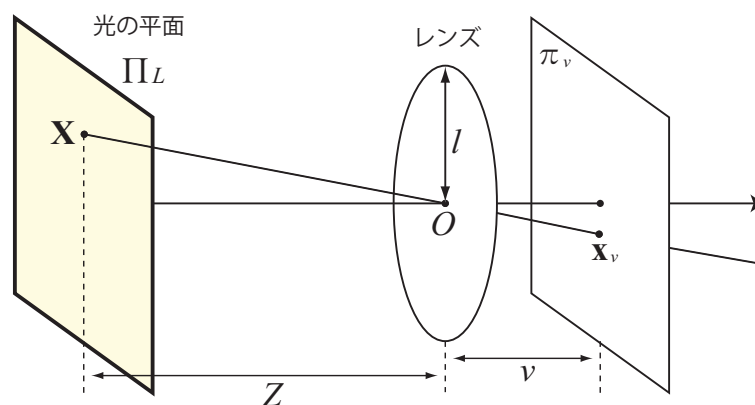


図 3.6: スリット光モデル

表 3.1 より明らかなように、 $s = 0.01[mm]$ のときテクスチャは $\Delta Z = 0.10[mm]$ においてやや取得できていない箇所があるが、 $\Delta Z = 0.20[mm]$ 以上の分解能において完全に取

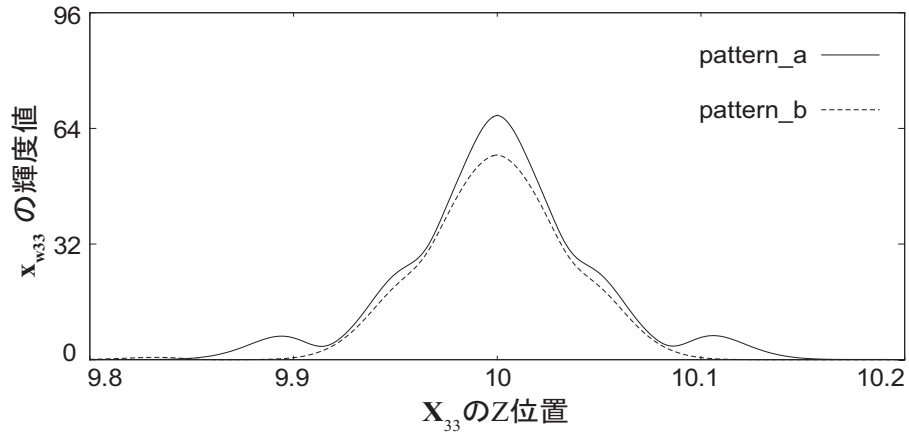


図 3.7: スリット光モデルを用いたシミュレーション結果

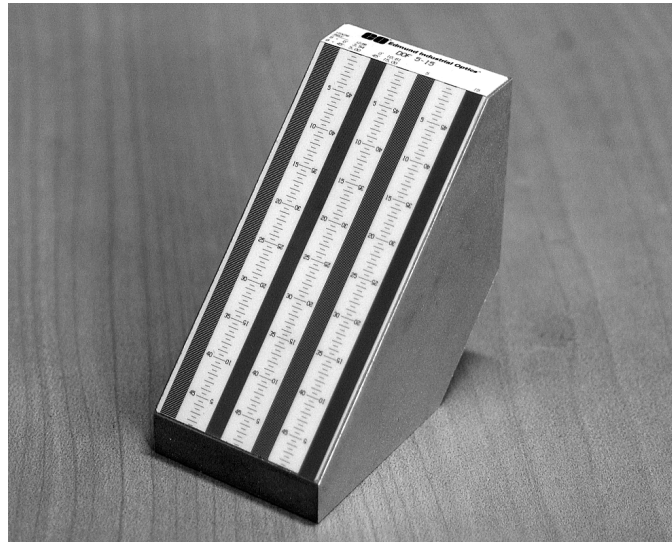


図 3.8: 標準サンプル

得できないことが見てとれる。同様に $s = 0.05[mm]$ では $\Delta Z = 0.5[mm]$ 、 $s = 0.1[mm]$ では $\Delta Z = 0.5[mm]$ において取得不可能である。したがって $s = 0.01[mm]$ のスリット幅を利用した場合の最大分解能は $\Delta Z = 0.05[mm]$ 、 $s = 0.05[mm]$ のスリット幅を利用した場合の最大分解能は $\Delta Z = 0.20[mm]$ 、 $s = 0.100[mm]$ のスリット幅を利用した場合の最大分解能は $\Delta Z = 0.20[mm]$ であることが言える。本撮影システムは s は 0.050 から 0.100 程度のスリット幅を利用して、実際には約 $1mm$ 程度のスリット光を生成し、移動間隔 $\Delta Z = 0.10[mm]$ で撮影を行っている。

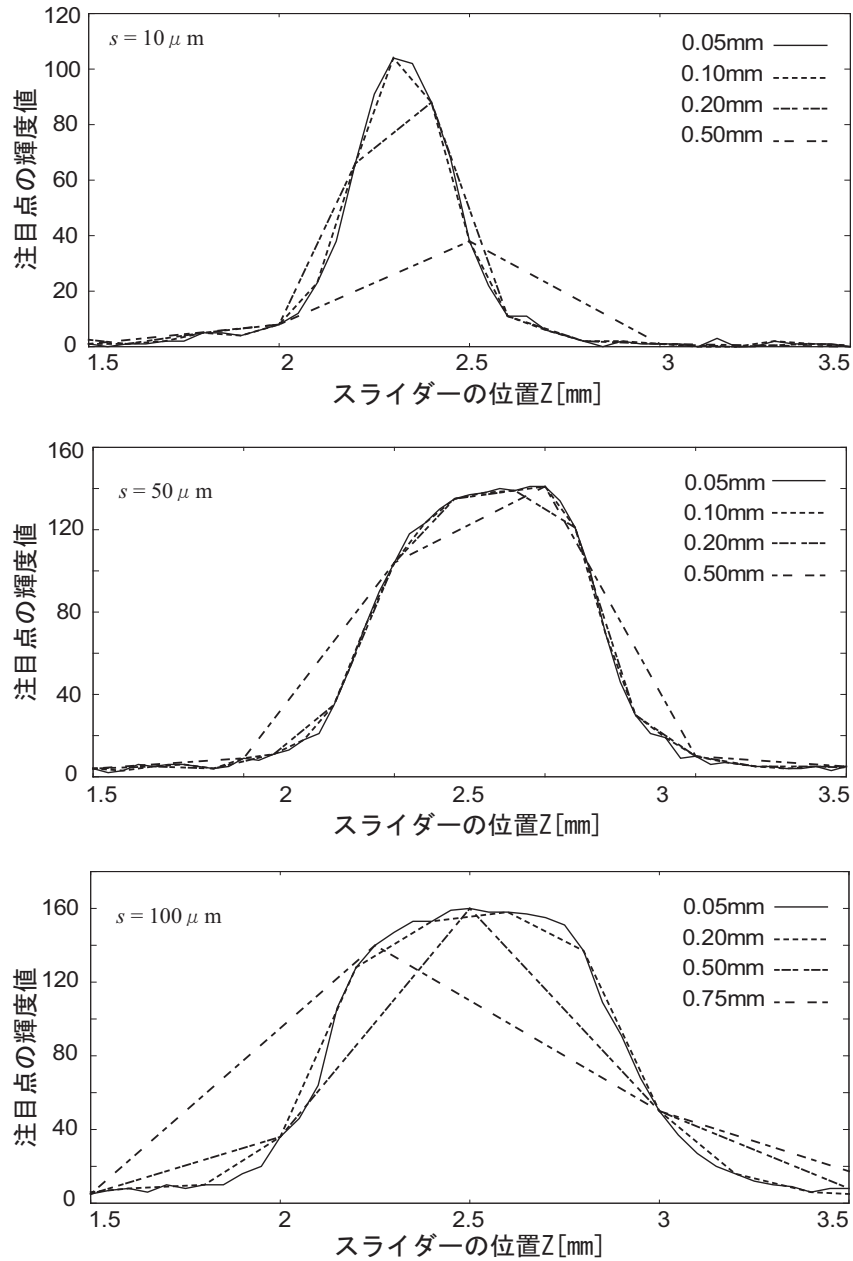


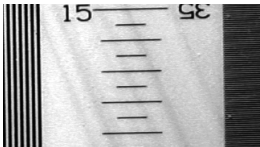
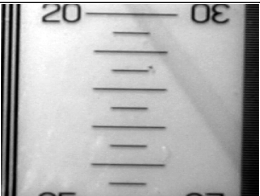


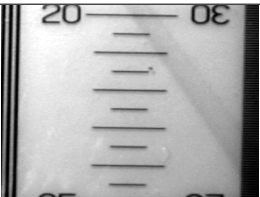
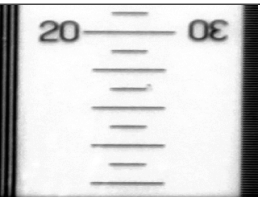
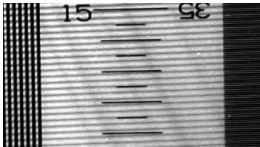
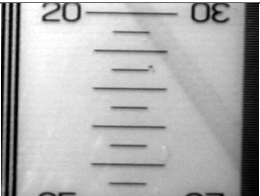

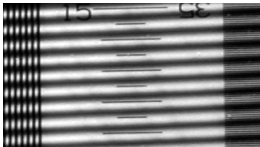


図 3.9: 各移動量と各スリット幅による撮影を行った場合の奥行き分解能

3.4 任意照明光による色情報の再計測法

スリット光源を用いることで3次元モデルの生成が可能となったが、スリット型光源では光源ユニットに使用されている光源の制約から図 3.10 に示すような不自然な色情報が得られてしまう。

また、生成したテクスチャ付き3次元モデルをCGコンテンツとして利用することを考えた場合、利用状況に適した色情報が獲得できることが望まれる。そこで、次の撮影工程を加える。撮影モード A が完了した後、その状態で任意の照明条件にて再度撮影を行う（図 13 の撮影モード B）。つまり、スリット光によって撮影された各画像それぞれに対し、そ

表 3.1: サンプル送り量とスリット幅の比較

		スリットの幅 [mm]		
		0.01	0.05	0.1
サンプル送り量 [mm]	0.05			
	0.1			
	0.2			
	0.5			

のままの状態では別の任意の照明によって撮影された画像を得る。そして、各画素の合焦点を検出した後、テクスチャを生成する際に、例えばある画素の合焦点が 10 枚目のスリット光画像に存在する場合、その画像に対応した別照明による画像における該当画素を使用する。このように同一位置においてスリット光源、並びに任意の照明により 2 回撮影を行うことで、撮影工程に倍の時間を要するものの、使用目的に応じたフォトリアルスティックなテクスチャを得ることが可能となる。今回は実験段階として、図 3.11 に示すように撮影対象物にディフューザーをかぶせ、さらにその周りに蛍光灯を配置することで 360 °すべての方向からやわらかい光が対象物表面を照らす照明機器を開発した。当然ながら、テクスチャ情報と 3 次元情報は同位置において獲得可能であることから両者を組み合わせる際に誤差は発生しない。図 3.12 に獲得された画像を示す。被写体本来の色が再現されている。



図 3.10: スリット光によるテクスチャ



図 3.11: ディフューザーと蛍光灯を用いた撮影システム

3.5 まとめ

本研究では薄凸レンズモデルによるボケの数値シミュレーションを行い、注目点の輝度値に加算される周囲の点からのボケ成分の振る舞いを明らかにした。従来の手法では被写界深度の影響から適用が困難であった昆虫に対し、薄い光の膜を生成するスリット型光源の開発を行い、カメラのフォーカスエリアのみを照明することで周囲のぼけ成分を除去する方法を考案し、3次元形状モデルとすべての画素にピントの合ったテクスチャの取得を可能とした計測法を確立、これを適用した計測装置を実現した。実際に開発した撮影装置を図 3.13 に示す。



図 3.12: 任意の照明で再計測・再構成したテクスチャ

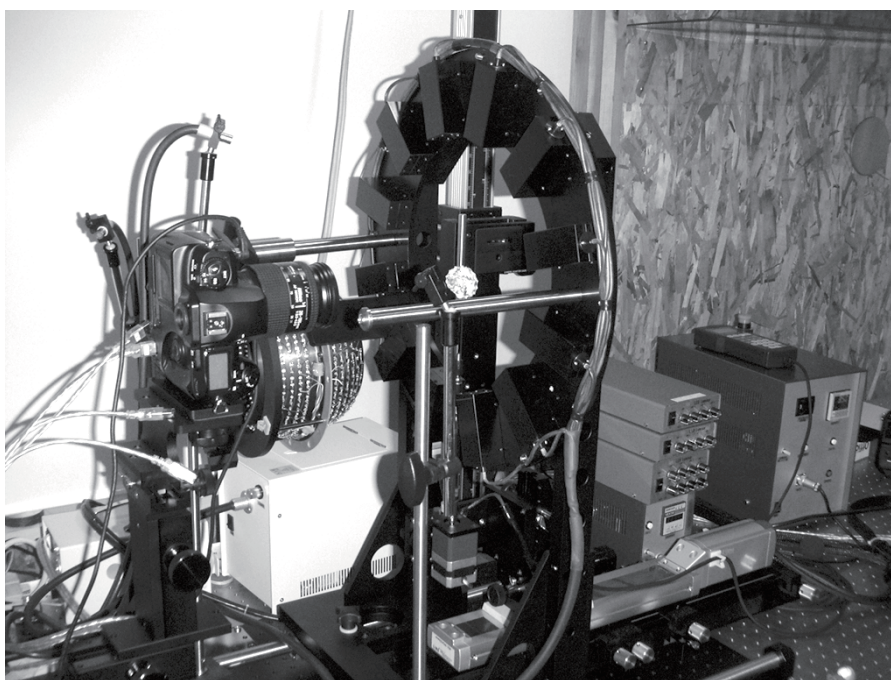


図 3.13: 開発した撮影装置

第 4 章

マテリアル情報(透過・拡散)の取得法

4.1 はじめに

近年、3次元形状計測およびIBMR(Image-based modeling and rendering)技術の進歩により、実画像から高精度の形状計測と高精細なテクスチャを生成することが可能となった[67, 101, 102, 103, 104, 63]。またコンピュータビジョンの分野からは、光の振る舞いと見え方をモデル化することで映像のリアル性を高めるための計測手法、表現法も提案されている[105, 106]。これらの技術を用いて現実中存在する物体をコンピュータ上に取り込み、高いリアル性を有した3次元コンピュータモデルとしての応用が盛んに行われている。

自然界にはガラス、植物や生物など半透明な性質を有した物体も数多く存在する。これらの半透明物体をリアルに表現するには、透過・屈折などの透明物体が有する光学的な特性を考慮する必要がある。CGでは、これらの半透明物体をリアルに表現するための議論は古くからされており、光線を追跡することで光学特性のレンダリングを可能とするレイトレーシング法や、物体を微小拡散面の集合体としてモデル化したラジオシティ法の提案によって基本的な概念はほぼ確立されたと言える。最近では実装面からこれらの手法を解説した話題も一般的となり[107, 108, 109]、さらにはより複雑で多くの光線を処理するための手法としてフォトンマッピング法などが提案されている[110]。これらの研究成果により、実写に迫るリアルなレンダリング画像を生成することは技術的に可能であるとさえ言われてきている。

その一方で前述のレンダリング手法に必要とされる光学特性のパラメータを実世界の物体から計測する手法については、統合的な解決策はいまだ見出されておらず、各々のパラメータ測定に特化した手法が提案されている。半透明物体の透過および屈折を推定する一般的な手法としては次の2つがある。ひとつは、物体全体を均一の物質によって構成されていると仮定し、その物質を推定することで透過・屈折を表現する手法である[74]。もうひとつは、物体の背面に既知色の背景を配置し、色の透過度合いから透過率を取得する手法である[75]。前者は自然物のように複数の物質から構成されている物体には適さない手法である。また、後者も物体が背景色と同じ色成分を有する場合に透過領域の誤判定が発生するため、自然物のような複雑な対象には適さない。

コピー用紙のような紙も光を透過させるため、半透明物体と定義することができる。紙には図4.1に示すように距離 d に応じて背後にある像をぼかしていくような現象を観測できる。このようなぼかし現象は、程度の差こそあれ、あらゆる半透明物体に見られる現象である。このぼかし現象については、従来ほとんど考慮されることはなく、必要な際はCG技術者によってそれらしく見えるように作成されるのがほとんどである。そこで本研究では、半透明物体の透過現象とぼかし現象の2特性を実用に耐えうるレベルで写真から測定、および表現する手法を提案する。

先行研究として多数の光源を配置することでさまざまな照明条件下において透過率・屈折率・白濁度を計測する手法も提案されている[76]。この手法が扱う物体の白濁度と屈折率によって表現されたぼけ現象は比較的遠距離にある背景像をぼかすための要素であり、本

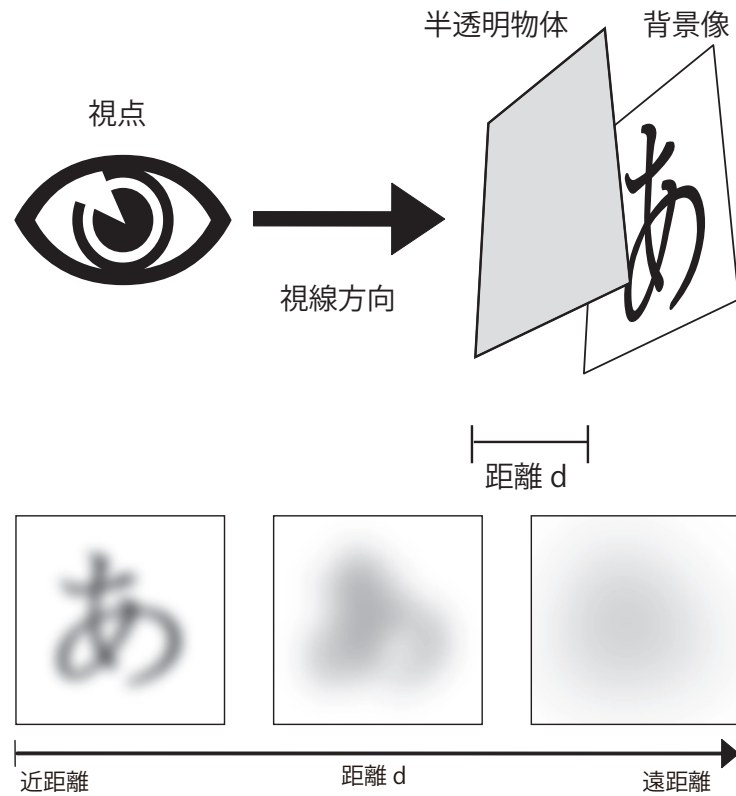


図 4.1: 紙に見られるぼかし現象

研究が扱う背景像との近傍におけるぼかし現象とは異なった現象である。

また、霧などによって引き起こされる Henyey-Greenstein 散乱のぼけ関数を推定している手法も提案されている [77]。主に大気の表現を目的として屈折からぼかし現象を再現する手法であり、昆虫への適用は難しい。

本研究では、従来の手法では取得が困難であった半透明物体と背景の距離に応じて見られる透過・拡散現象に由来するマテリアル情報を、画像から画素ごとに計測する手法を考案し、計測装置の開発、およびレンダリング法の研究を行う。

4.2 透過・ぼかし現象のモデル化

はじめに、半透明物体に見られる透過とぼかしの現象を再現するためのマテリアル情報を取得するために、透過・ぼかし現象のモデル化を行う。

4.2.1 立体角

図 4.2 に示すような、半径 r の球体の表面積 S に対して、次式を満たす 3 次元空間の角度を立体角 Ω と呼ぶ。

$$S = r^2 \Omega \quad (4.1)$$

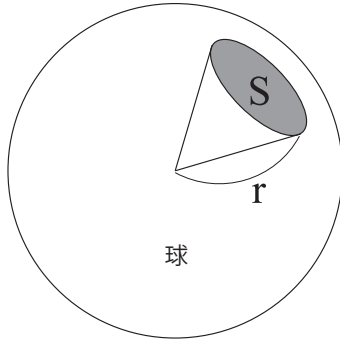


図 4.2: 立体角

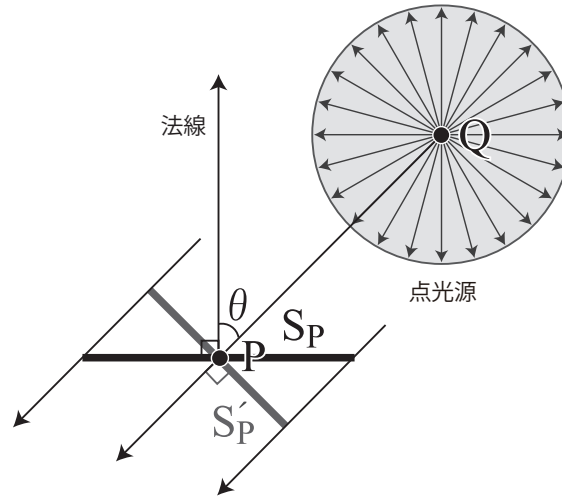


図 4.3: 点光源

4.2.2 光度, 光束, 照度, 輝度

図 4.3 に示すように、3 次元空間中にはすべての方向に対して光度 I の明るさを持った標準の点光源 $Q = [Q_X, Q_Y, Q_Z]^T$ と点 $P = [P_X, P_Y, P_Z]$ を中心とした面積 S_P があるとする。

面積 S_P に入射する光束 L と、光源の光度 I の関係は、3 次元空間中における広がりをあらわした立体角 Ω を用いて次式のように記述できる。

$$I = \frac{L}{\Omega} \quad (4.2)$$

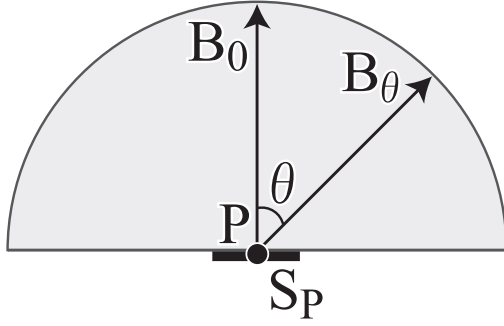


図 4.4: 均等拡散反射面の輝度分布

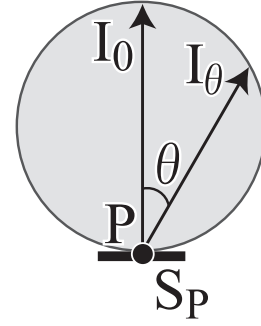


図 4.5: 均等拡散反射面の光度分布

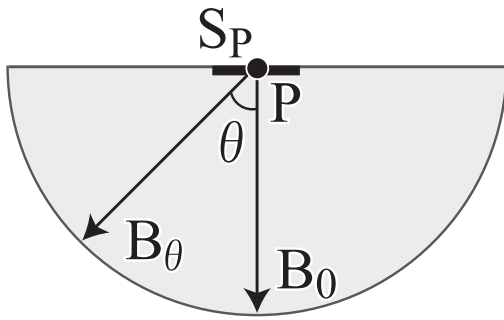


図 4.6: 均等拡散透過面の輝度分布

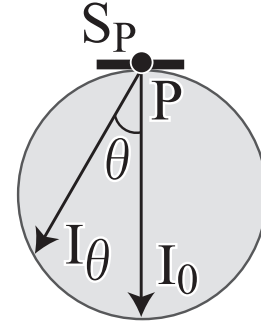


図 4.7: 均等拡散透過面の光度分布

点 P, Q を結んだ直線と面積 S_P の法線とがなす角を θ 、 θ 方向へ正投影して得られた面積を S'_P とすると、式 (4.1) より S'_P 、立体角 Ω 、点 P, Q 間の距離には次の関係が成り立つ。

$$S'_P = \|\mathbf{P} - \mathbf{Q}\|^2 \Omega \quad (4.3)$$

$$S'_P = S_P \cos \theta \quad (4.4)$$

ここで $\|\cdot\|$ はノルムをあらわす。

式 (4.2)、(4.3)、および (4.4) より、面積 S_P に入射する光束 L は次式で求まる。

$$L = \frac{I S_P \cos \theta}{\|\mathbf{P} - \mathbf{Q}\|^2} \quad (4.5)$$

式 (4.5) より、特定の面積に入射する光束は面積と光源の距離に対して二乗で減少することがわかる。これを距離の逆二乗則と呼ぶ。また光束は入射角の余弦に比例する。これを Lambert の余弦則と呼ぶ [111, 112]。

面積 S に対して光束 L が照射されるとき、入射角にかかわらず照度 E は次式であらわされる。

$$E = \frac{L}{S} \quad (4.6)$$

面積 S が照度 E で照らされているとき、面積 S の輝度 B は次式であらわされる。

$$B = \kappa_r \frac{E}{\pi} \quad (4.7)$$

ここで κ_r は面積 S の拡散反射率である。ただし、面積 S は均等拡散反射面とする。

均等拡散反射面とは、図 4.4 に示すようにすべての方向に対しての一定の輝度を持った面のことを言う。

$$B_\theta = B_0 \quad (4.8)$$

面積 S が輝度 B を持つとき、観測方向と面積 S_P の法線がなす角 θ へ照射される光度 I_θ は、式 (4.4) のように θ 方向へ正投影して得られた面積 S'_P を用いて次式で表せる。

$$I_\theta = BS'_P, \quad S'_P = S_P \cos \theta \quad (4.9)$$

均等拡散反射面における光度分布を図 4.5 に示す。

同様に、半透明物体の透過面において図 4.6 に示す輝度分布を持った面のことを均等拡散透過面と言い、その拡散の度合いを表した係数 κ_t を拡散透過率と呼ぶ。均等拡散透過面の光度分布を図 4.7 に示す。

式 (4.6)、および式 (4.7) より面積 S が受ける光束と、面積 S が発する輝度には次の関係がある。

$$B = \kappa_r \frac{L}{\pi S} \quad (4.10)$$

また $\kappa_r \frac{L}{\pi}$ は面積 S が反射した光束をあらわしていることから、輝度 B と面積 S が発する光束 L' には次の関係が成り立つ。

$$B = \frac{L'}{S} \quad (4.11)$$

図 4.8 に示すように、視点 $\mathbf{C} = [C_X, C_Y, C_Z]^T$ から輝度 B の明るさを持った面積 S を観測したとする。このとき、視点の瞳に入射する光束 $L_{P \rightarrow C}$ は、式 (4.5) と同様に距離 $\|\mathbf{P} - \mathbf{C}\|$ の二乗で減少する。また視点 \mathbf{C} において観測される面積 S も透視投影法により距離 $\|\mathbf{P} - \mathbf{C}\|$ の二乗で縮小する。つまり、距離 $\|\mathbf{P} - \mathbf{C}\|$ が遠くなればなるほど瞳に入る光束は少なくなるが、同時に面積も同じ比率で縮小する。そのため輝度は視点との距離にかかわらず、常に一定の値となる。これを輝度不変則と呼ぶ [113]。

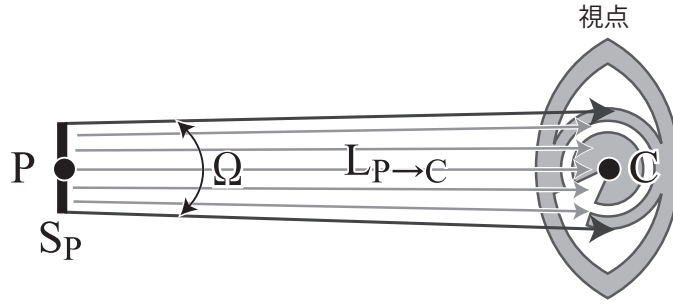


図 4.8: 輝度不変則

4.2.3 正透過率, 拡散反射率, 拡散透過率, 吸収率

本論文では、光の性質を次のように仮定する。

仮定 1 光は半透明物体を通過する際に屈折, 鏡面反射をしない。

仮定 2 半透明物体は均等拡散反射面, 均等拡散透過面とする。

仮定 3 半透明物体を通過する光はレイリー散乱, ミー散乱, 等方散乱などの散乱をしないものとする。

3次元空間中に視点 C、均等拡散反射面上に点 Q を中心とした面積 S_Q 、半透明物体上に点 P を中心とした面積 S_P があるとする。図 4.9 に示すように、面積 S_Q がある光源か

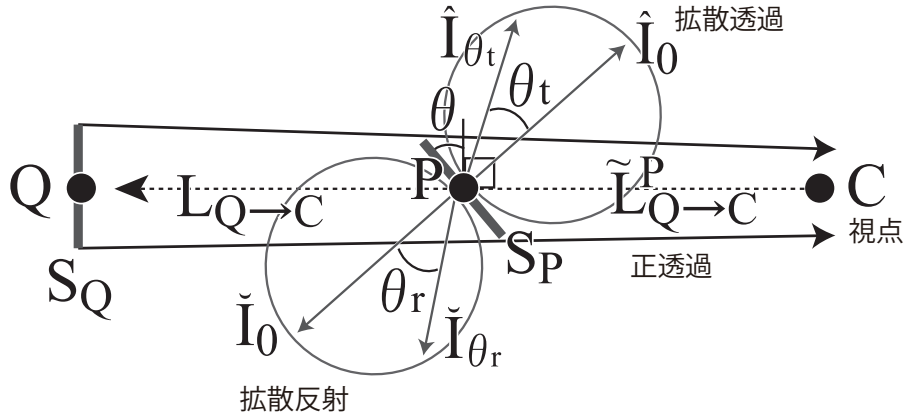


図 4.9: 光の関係

らの光を受けて視点 C 方向へ照射する光束を $L_{Q→P}$ とすると、面積 S_P を直進して減衰された光束 $\tilde{L}_{Q→C}^P$ 、拡散反射による光束 $\tilde{L}_{Q→C}^P$ 、拡散透過による光束 $\hat{L}_{Q→C}^P$ 、吸収された光

束 $\bar{L}_{Q \rightarrow C}^P$ には次の関係がある。

$$L_{Q \rightarrow P} = \tilde{L}_{Q \rightarrow C}^P + \check{L}_{Q \rightarrow C}^P + \hat{L}_{Q \rightarrow C}^P + \bar{L}_{Q \rightarrow C}^P \quad (4.12)$$

$$\tilde{L}_{Q \rightarrow C}^P = \iota L_{Q \rightarrow P} \quad (4.13)$$

$$\check{L}_{Q \rightarrow C}^P = \kappa_r L_{Q \rightarrow P} \quad (4.14)$$

$$\hat{L}_{Q \rightarrow C}^P = \kappa_t L_{Q \rightarrow P} \quad (4.15)$$

$\tilde{L}_{Q \rightarrow C}^P$ のように、光が半透明物体を直進することを拡散透過光と区別して正透過、透過の度合いを表した変数 ι を正透過率と呼ぶ。

4.2.4 薄サーフェイスモデル

点 Q から半透明物体上の点 P を通過して視点 C に観測される光束 L があるとする。このとき光束 L は半透明物体に入射して点 P を出るまでの間、半透明物体中の物質によって拡散・減衰する。半透明物体が複数の物質によって複雑に混ざり合っている場合、光路上の物質を正確にモデル化することは非常に困難である。

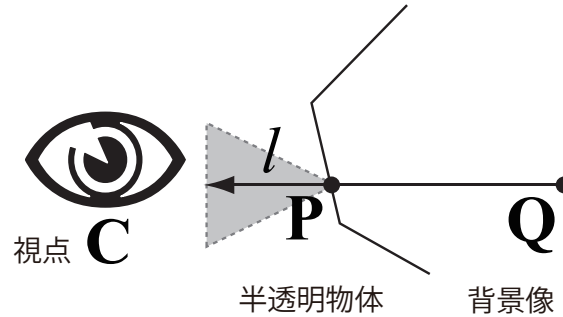


図 4.10: サーフェイスモデルによる光学現象

そこで本論文では図 4.10 に示すように、物体を非常に薄い一枚のサーフェイスモデルとして扱うとともに、非常に微小な面積を点とし、考慮する光学現象はすべて点 P のみによって引き起こされると近似的にモデル化することにする。

4.2.5 ぼかしモデル

図 4.11 に示すように、3 次元空間中に視点 C 、半透明物体上の点 P 、および背景像上に存在する n 個の点 $Q_{i,j}$ があるとする。ただし視点 C において点 P と点 $Q_{0,0}$ は重なって観測されているものとする。

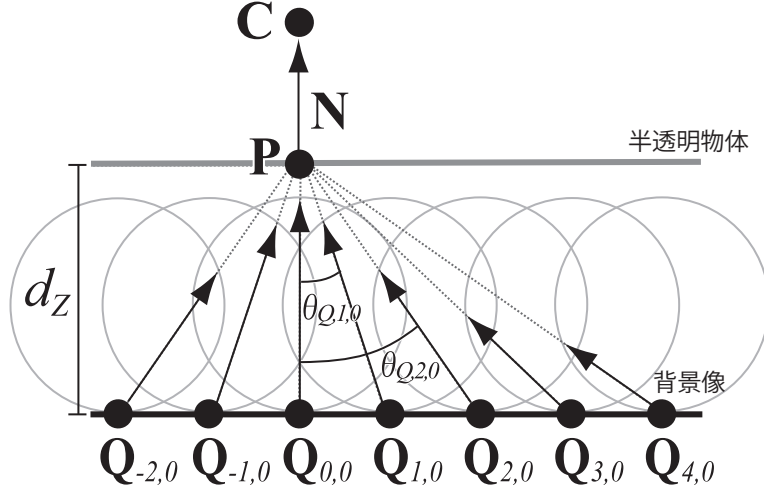


図 4.11: ぼかしモデル

式を簡略化するために、カメラの投影面と物体表面、および背景像は平行な平面であるとする。半透明物体と背景像の距離を d_Z であらわす。点 $Q_{i,j}$ から点 P に向かう光束を $L_{Q_{i,j} \rightarrow P}$ 、入射角を $\theta_{Q_{i,j}}$ とする。点は法線をもった面積 1 の円盤とする。このとき、 $L_{Q_{i,j} \rightarrow P}$ の立体角 $\Omega_{Q_{i,j} \rightarrow P}$ は式 (4.1) より次式であらわされる。

$$\Omega_{Q_{i,j} \rightarrow P} = \frac{\cos \theta_{Q_{i,j}}}{\|\mathbf{P} - \mathbf{Q}_{i,j}\|^2} \quad (4.16)$$

点 $Q_{i,j}$ から点 P に向かう光度 $I_{Q_{i,j} \rightarrow P}$ は式 (4.9) より次式であらわされる。

$$I_{Q_{i,j} \rightarrow P} = B_{Q_{i,j}} \cos \theta_{Q_{i,j}} \quad (4.17)$$

よって、 $L_{Q_{i,j} \rightarrow P}$ は式 (4.2) より次のように求まる。

$$L_{Q_{i,j} \rightarrow P} = I_{Q_{i,j} \rightarrow P} \Omega_{Q_{i,j} \rightarrow P} \quad (4.18)$$

$$= B_{Q_{i,j}} D_b(d_{XY_{i,j}}, d_Z) \quad (4.19)$$

$$D_b(d_{XY_{i,j}}, d_Z) = \frac{\cos \left(\arctan \left(\frac{d_{XY_{i,j}}}{|d_Z|} \right) \right)}{d_{XY_{i,j}}^2 + d_Z^2} \quad (4.20)$$

$$d_{XY_{i,j}} = \sqrt{(P_X - Q_{i,j,X})^2 + (P_Y - Q_{i,j,Y})^2}$$

ここで関数 $D_b(d_{XY_{i,j}}, d_Z)$ は図 4.12 に示す通り、 P と $Q_{i,j}$ との距離 $d_{XY_{i,j}}$ 、および背景像

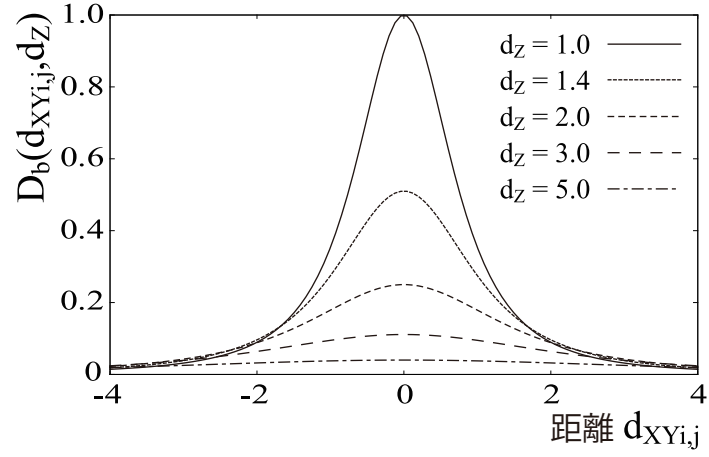


図 4.12: ぼかし関数 D_b

と半透明物体との距離 d_Z によって決定されるぼかし関数である。

このとき、視点 C において観測される拡散透過による輝度 $\hat{B}_{\Sigma Q_i \rightarrow C}^P$ は次式で求まる。

$$\hat{B}_{\Sigma Q_i \rightarrow C}^P = \frac{\kappa_t}{\pi} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} B_{q_{i,j}} D_b(D_b(d_{XY_{i,j}}, d_Z)) \quad (4.21)$$

視点 C において点 P と重なって観測される点 $Q_{0,0}$ が存在するとき、その正透過による光束 $\tilde{L}_{Q_{0,0} \rightarrow C}^P$ は式 (4.13) より次のようにあらわされる。

$$\tilde{L}_{Q_{0,0} \rightarrow C}^P = \iota L_{Q_{0,0} \rightarrow P} \quad (4.22)$$

また $L_{Q_{0,0} \rightarrow P}$ は点 $Q_{0,0}$ が発する光束であるから輝度そのものである。よって式 (4.11) より次のように書きなおせる。

$$\tilde{B}_{Q_{0,0}}^P = \iota B_{Q_{0,0}} \quad (4.23)$$

4.3 測定法

正透過、拡散透過、どちらも光の透過現象を示すものである。そこで、はじめに正透過成分、拡散透過成分を区別せずに透過をあらわした成分である透過率 α の推定を行い、求まった透過率を正透過率と拡散透過率に分離する。

4.3.1 透過率 α , および半透明物体の色 $\Gamma(P)$ の推定法

図 4.13 に示すように 3 次元空間中に視点 C 、半透明物体を挟んで視点 C 側に ∞ 個の光源 $U_{i,j}$, 背景像上に ∞ 個の点 $Q_{i,j}$ があるとする。ただし、半透明物体は平面、光源 $U_{i,j}$, $Q_{i,j}$

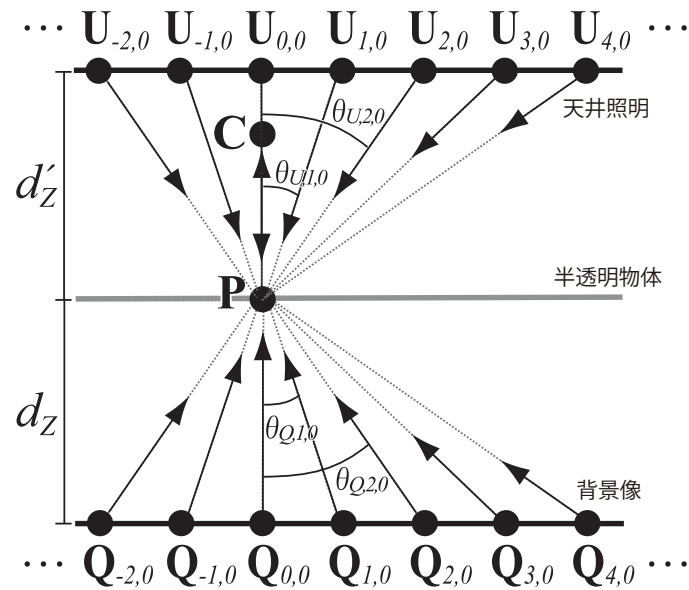


図 4.13: 透過率測定時の照明環境

は半透明物体と平行な均等拡散面上に並んでおり、それぞれ均一の輝度 B_U, B_Q を発しているとする。

半透明物体上の点 P に作用する成分のみに注目すると、視点 C で観測される点 P の輝度 B は、式 (4.23) より正透過による輝度、式 (4.21) より拡散透過による輝度、拡散透過と

同様に求まった拡散反射による輝度の総和として次のように求まる。

$$B = \tilde{B}_{\mathbf{Q}_{0,0}}^{\mathbf{P}} + \hat{B}_{\Sigma\mathbf{Q}_i \rightarrow \mathbf{C}}^{\mathbf{P}} + \check{B}_{\Sigma\mathbf{U}_i \rightarrow \mathbf{C}}^{\mathbf{P}} \quad (4.24)$$

$$\tilde{B}_{\mathbf{Q}_{0,0}}^{\mathbf{P}} = \iota B_{\mathbf{Q}} \quad (4.25)$$

$$\hat{B}_{\Sigma\mathbf{Q}_i \rightarrow \mathbf{C}}^{\mathbf{P}} = \frac{\kappa_t}{\pi} B_Q \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} D_b(d_{XY_{i,j}}, d_Z)$$

$$\check{B}_{\Sigma\mathbf{U}_i \rightarrow \mathbf{C}}^{\mathbf{P}} = \frac{\kappa_r}{\pi} B_U \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} D_b(d_{XY_{i,j}}, d'_Z)$$

図 4.13 の照明環境のように輝度が一定であり、 $\mathbf{Q}_{i,j}$ が限りなく連続に並んでいると仮定するならば、 $\hat{B}_{\Sigma\mathbf{Q}_{i,j} \rightarrow \mathbf{C}}^{\mathbf{P}}$ は次のように求めることができる。

$$\begin{aligned} \hat{B}_{\Sigma\mathbf{Q}_{i,j} \rightarrow \mathbf{C}}^{\mathbf{P}} &= \frac{\kappa_t}{\pi} B_Q \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{X^2 + Y^2 + d_{Z'}^2} \cos\left(\arctan\left(\frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{d_{Z'}}\right)\right) dX dY, \\ &= 4 \frac{\kappa_t}{\pi} B_Q \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{d_{Z'}}{(X^2 + Y^2 + d_{Z'}^2)^{\frac{3}{2}}} dX dY, \\ &= 4 \frac{\kappa_t}{\pi} B_Q \int_0^{\infty} \frac{d_{Z'}}{Y^2 + d_{Z'}^2} dY = 2\kappa_t B_Q. \end{aligned} \quad (4.26)$$

ただし、式中では $\mathbf{P}-\mathbf{U}_{i,j}$ を 3 次元座標 $X, Y, Z (= d'_{Z'})$ に置き換えている。同様に $\check{B}_{\Sigma\mathbf{U}_i \rightarrow \mathbf{C}}^{\mathbf{P}}$ も求めると式 (4.24) は次のように書きなおせる。

$$B = \iota B_{\mathbf{Q}} + 2\kappa_t B_Q + 2\kappa_r B_U \quad (4.27)$$

よって、透過率 α 、および半透明物体上の点 \mathbf{P} のテクスチャの輝度 $B_{\mathbf{P}}$ は次のようにあらわされる。

$$B = (1 - \alpha) B_{\mathbf{P}} + \alpha B_Q \quad (4.28)$$

$$\alpha = 2\kappa_t + \iota \quad (4.29)$$

$$B_{\mathbf{P}} = \frac{2\kappa_r}{1 - \alpha} B_U \quad (4.30)$$

いま $(1 - \alpha) B_{\mathbf{P}} = B'_{\mathbf{P}}$ と置くと式 (4.28) は次のように書きなおせる。

$$B = B'_{\mathbf{P}} + \alpha B_Q \quad (4.31)$$

ここで、 B, B_Q は実際に観測が可能な変数であるから、未知数は $\alpha, B'_{\mathbf{P}}$ の 2 変数である。

よって2色の異なった背景色 B_{Q_1} B_{Q_2} のみを撮影した画像と、それぞれの背景色において撮影された半透明物体の画像 B_1, B_2 を撮影することで、次のように求めることができる。

$$\begin{bmatrix} \alpha & B'_P \end{bmatrix}^T = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \Psi \quad (4.32)$$

$$\Psi = [B_1, B_2]^T, \mathbf{M} = \begin{bmatrix} B_{Q_1} & 1 \\ B_{Q_2} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

半透明物体の色 B_P は透過率 α が 1.0 でないならば次のように求まる。

$$B_P = (1 - \alpha)^{-1} B'_P \quad (4.34)$$

4.3.2 正透過率 ι , 拡散透過率 κ_t の測定法

次に、求まった透過率 α から、背面からの正透過率 ι と拡散透過率 κ_t を分離する方法を示す。

撮影時に背景像を完全に除去した状態で半透明物体を撮影する。このとき観測された輝度を B_B とする。輝度 B_B は、式 (4.24) より半透明物体の拡散反射率 κ_r を用いて次のように表せる。

$$B_B = 2\kappa_r B_U \quad (4.35)$$

同様に背景像を完全に除去した状態で拡散反射率が既知の物体を撮影する。

$$B_{Neutral} = 2\kappa_{Neutral} B_U \quad (4.36)$$

拡散反射率 $2\kappa_{Neutral}$ が既知であるから、(4.36) より照明の輝度 B_U は次のように求まる。

$$B_U = \frac{B_{Neutral}}{2\kappa_{Neutral}} \quad (4.37)$$

よって式 (4.35)、(4.37) より拡散反射率 κ_t は次のように求まる。

$$2\kappa_r = \frac{B_B}{B_U} \quad (4.38)$$

半透明物体が非常に薄い物体であるとする、裏側からの拡散透過率 κ_t は透過率 $\alpha/2$ を超えない範囲で限りなく κ_t に近いと見込める。したがって、拡散透過率 κ_t 、および正透過

率 ι は次のように求めることができる。

$$2\kappa_t = \min(\alpha, 2\kappa_r), \quad (4.39)$$

$$\iota = \alpha - 2\kappa_t. \quad (4.40)$$

式が複雑になるのを回避するため、これまで色成分を省略して記述してきたが、実際には画像作成のため R,G,B それぞれの成分について独立に半透明物体の色、正透過率、拡散透過率、拡散反射率を求める必要がある。

4.4 レンダリング方法

提案手法によって測定された半透明物体の色 $B_{P,R}, B_{P,G}, B_{P,B}$ 、各色成分の正透過率 $\iota_R, \iota_G, \iota_B$ 、および拡散透過率 $\kappa_{t,R}, \kappa_{t,G}, \kappa_{t,B}$ を用いて、透過・ばかし現象を考慮したレンダリングの手法を示す。なお半透明物体の形状 P 、背景像の形状 Q および色 $B_{Q,R}, B_{Q,G}, B_{Q,B}$ は既に測定済みであるとする。

画像を Img 、画像 Img 上の画素 (x, y) をカラー画像であれば $\text{Img}(x, y) = [R, G, B]^T$ 、濃淡画像であれば $\text{Img}(x, y) = V$ であらわすことにする。

半透明物体をレンダリング: ImgP 透過率を考慮せずに半透明物体をレンダリングする。

$$\begin{aligned} \text{ImgP}(x, y) &= [B_{P,R}, B_{P,G}, B_{P,B}]^T, \\ \text{ただし } x &= \frac{P_X}{P_Z}, y = \frac{P_Y}{P_Z} \text{ とする.} \end{aligned} \quad (4.41)$$

背景像をレンダリング: ImgQ 背景像をレンダリングする。

$$\begin{aligned} \text{ImgQ}(x, y) &= [B_{Q,R}, B_{Q,G}, B_{Q,B}]^T, \\ \text{ただし } x &= \frac{Q_X}{Q_Z}, y = \frac{Q_Y}{Q_Z} \text{ とする.} \end{aligned} \quad (4.42)$$

距離の差分画像を生成: ImgD 半透明物体と背景像の距離の差分画像を生成する。

$$\begin{aligned} \text{ImgD}(x, y) &= \|\mathbf{Q} - \mathbf{P}\|, \\ \text{ただし } x &= \frac{P_X}{P_Z} = \frac{Q_X}{Q_Z}, y = \frac{P_Y}{P_Z} = \frac{Q_Y}{Q_Z} \text{ とする.} \end{aligned} \quad (4.43)$$

ばかし画像を生成: ImgB 距離の差分 $\text{ImgD}(x, y)$ を元に、式 (4.20) に示したばかし関数 $D_b(P, Q)$ を背景画像 ImgQ に適用する。

$$\begin{aligned} \text{ImgB}(x, y) &= \int \int D_b(\sqrt{x'^2 + y'^2}, \text{ImgD}(x, y)) \\ &\quad \text{ImgQ}(x', y') dx' dy' \end{aligned} \quad (4.44)$$

画像の合成: ImgF 生成した画像 $\text{ImgP}(x, y)$, $\text{ImgB}(x, y)$, $\text{ImgQ}(x, y)$ を合成する。

$$\begin{aligned}\text{ImgF}(x, y) = & (1.0 - \text{ImgA}(x, y))\text{ImgP}(x, y) \\ & + \text{ImgK}(x, y)\text{ImgB}(x, y) \\ & + \text{ImgI}(x, y)\text{ImgQ}(x, y)\end{aligned}$$

ここで $\text{ImgA}(x, y)$ 、 $\text{ImgK}(x, y)$ 、 $\text{ImgI}(x, y)$ はそれぞれ $x = \frac{P_X}{P_Z}$, $y = \frac{P_Y}{P_Z}$ を満足する点 P の透過率 $\alpha_R, \alpha_G, \alpha_B$ 、正透過率 $\iota_R, \iota_G, \iota_B$ 、拡散透過率 $\kappa_{t,R}, \kappa_{t,G}, \kappa_{t,B}$ によって生成された画像である。

4.5 実験

4.5.1 測定装置の検証

実際に測定を行うために作成した装置を図 4.14 に示す。測定装置は 4 つの蛍光灯と写真用のディフューザーを用いることで図 4.13 に示した表側の照明 $U_{i,j}$ を、ライトボックスを用いることで背景像の照明 $Q_{i,j}$ を生成している。

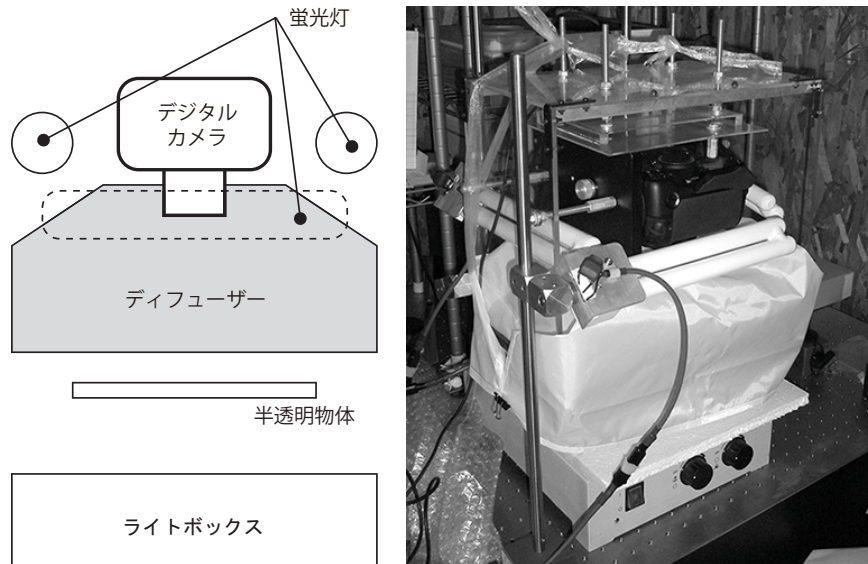


図 4.14: 試作した測定装置

照明 $U_{i,j}$ の輝度 B_U を求めるために、銀-シルクグレーカード (18 %標準反射板) を用いた。背景像はライトボックスをそのまま撮影して得られた ImgBQ_1 と、グレーの半透明なアクリル板をライトボックスの上に載せて撮影した ImgBQ_2 の 2 種類を用いることにする。なお、画像は各色成分 16bit 階調で計測を行った。

表 4.1 に測定されたシルクグレーカードの画像 ImgBN と背景像 $\text{ImgBQ}_1, \text{ImgBQ}_2$ 、それぞれの平均値と標準偏差を示す。

ImgBQ_2 ではほこりなどの写りこみにより分散がやや大きくなっているが、概ね均一な照明環境が構築されている。

4.5.2 昆虫の羽の測定

昆虫の羽を白背景で撮影した画像 ImgB_1 を図 4.15、グレー背景で撮影した画像 ImgB_2 を図 4.16 に示す。

撮影した $\text{ImgB}_1, \text{ImgB}_2$ の輝度から求めた透過率を表す濃淡画像 ImgA を図 4.17 に示す。

実際に三次元モデルに透過現象を適用したレンダリング結果を図 4.18 に示す。

表 4.1: 測定装置の検証




	ImgBN		ImgBQ ₁		ImgBQ ₂	
						
成分	平均	分散	平均	分散	平均	分散
Red	28048	428	57037	265	15504	1329
Green	28210	364	57172	238	15733	1274
Blue	28210	364	57119	235	15474	1214

表 4.2: 取得した画像

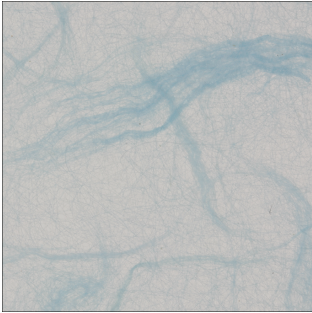
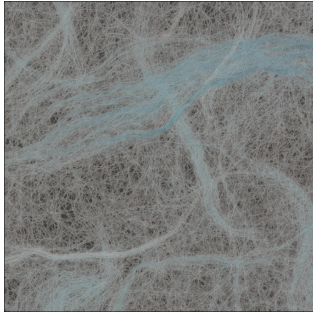
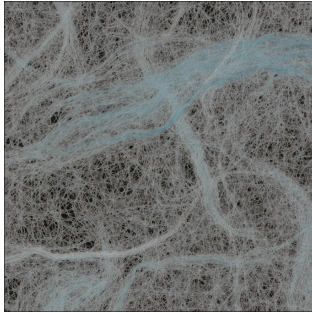
ImgB ₁	ImgB ₂	ImgB _B
		
白背景にて撮影された和紙	グレー背景にて撮影された和紙	黒背景にて撮影された和紙



図 4.15: 白背景で撮影した羽 ImgB_1



図 4.16: グレイ背景で撮影した羽 ImgB_2



図 4.17: 求まった昆虫の羽の透過率 ImgA



図 4.18: 昆虫の羽に対して透過現象を適用した例

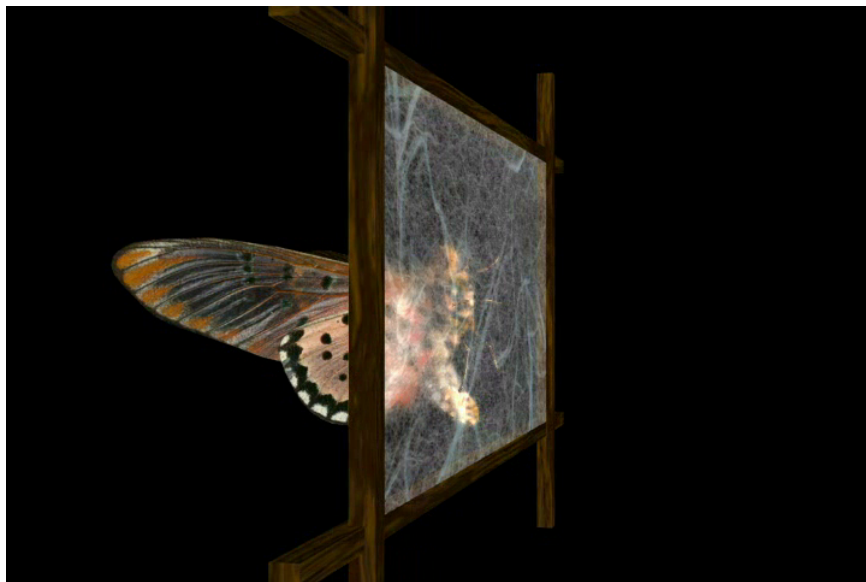


図 4.19: 手すき和紙に対して透過・ぼかし現象を適用した例

4.5.3 手すき和紙の測定

透過率測定のために撮影した画像を表 4.2 に示す。

測定値 ImgB_1 , ImgB_2 , より求めた透過率を ImgA 、半透明物体の色情報を ImgP に、また予め求めた照明光 B_U および測定値 ImgB_B によって分離された拡散透過率 ImgKt 、正透過率 ImgI を表 4.3 に示す。

実際に三次元モデルに透過・ぼかし現象を適用したレンダリング結果を図 4.19 に示す。表 4.4 には手すき和紙越しに羽ばたく蝶のレンダリング結果を示す。左側は透過現象のみ適用した例、左側は透過・ぼかし現象を適用した例である。

4.5.4 測定方式の検証

本論文が試作した測定装置では、上部の蛍光灯とバックライトが固定、カメラと半透明物体間の距離を固定したまま上下方向へ移動しながら撮影することが可能である。提案方式の有効性を示すために、背景像 $Q_{i,j}$ を生成するライトボックスと半透明物体の距離 d を増加方向に移動させながら測定を行った。求めた拡散透過画像を ImgKt_d としたとき、初期位置において求めた拡散透過画像 ImgKt_0 との差の絶対値の平均を図 4.20 に示す。ただしノイズの影響を考慮して、座標 (x,y) を中心とした 5×5 の平均値から差の絶対値を求め、それらの平均差を $\text{Dif}(\text{ImgKt}_0, \text{ImgKt}_d)$ とする。

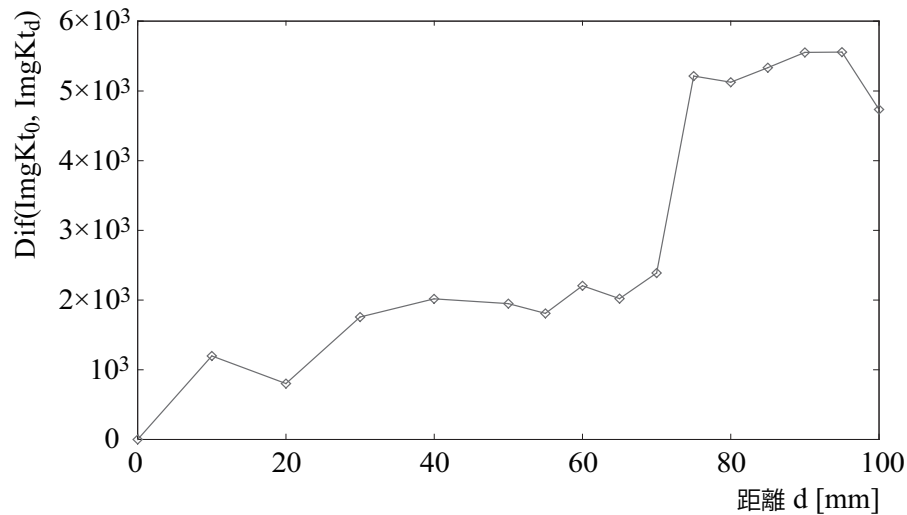


図 4.20: 平均差 $\text{Dif}(\text{ImgKt}_0, \text{ImgKt}_d)$

図 4.20 より、距離 70mm まで安定した解が得られているが、それ以降から誤差が 2 倍となることが見て取れる。

表 4.3: 測定によって求めた透過率, 物体色

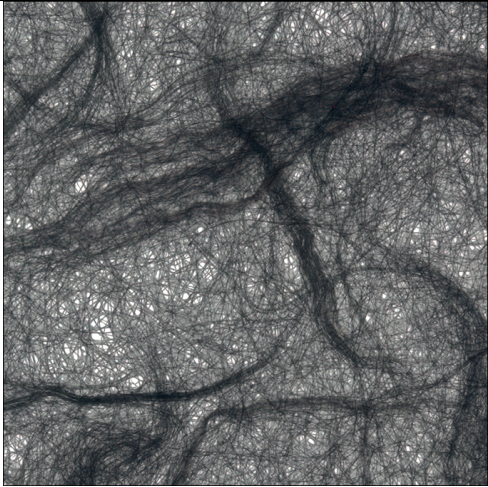
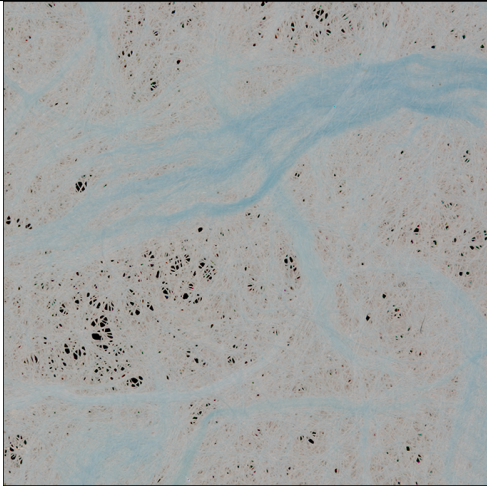
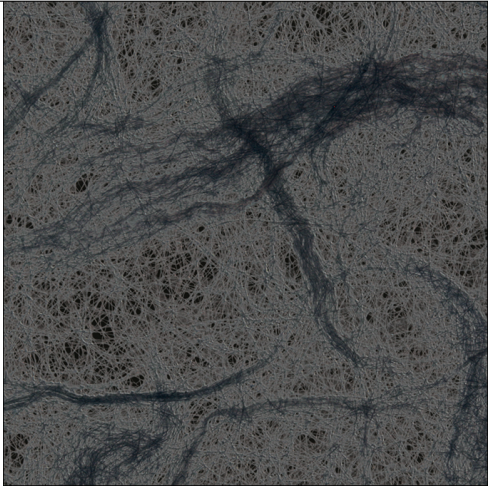
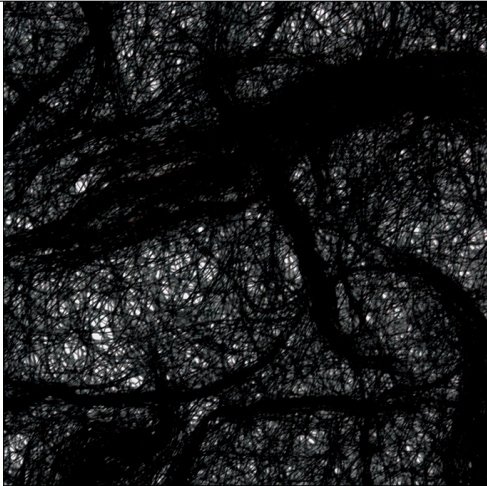






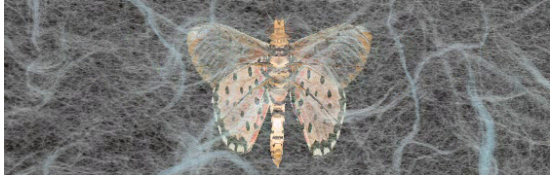



ImgA	ImgP
	
2ImgKt	ImgI
	

表 4.4: 和紙越しに羽ばたく蝶のレンダリング画像

透過現象のみ適用	透過・ぼかし現象を適用
	
	
	
	
	

4.6 まとめ

光度、光束、照度、輝度を基に透過・ぼかし現象のモデル化を行うことで、マテリアル情報（透過・拡散）の測定法および表現法を提案した。これにより、従来手作業による作成では困難であった画素ごとのマテリアル情報（透過・拡散）を写真から測定することが可能となった。また、従来あまり考慮されていなかったぼかし現象の表現も本手法を用いることで測定、表現することが可能となった。本提案手法を用いることで図 4.18, 図 4.19, 表 4.4 に示す通り、良好な結果を得ることができる。

本提案手法が扱う透過・ぼかしモデルは屈折、鏡面反射といった光学特性、および被写界深度による焦点はずれのぼけ現象を考慮していないため、光学的に正確な測定結果を得られるわけではないが、実験に示した通り背景像との距離が異なってもほぼ一定の測定値が得ることが可能であるため、有効的な手法であると言える。

第 5 章

動きの取得法

本章では、デジタル昆虫図鑑を作成するために、昆虫の動きを取得する方法について述べる。

5.1 はじめに

昆虫はさまざまな魅力的な動きを持っており、これらをデジタル昆虫図鑑に収録することは種の同定や学習のために非常に重要である。例えばカマキリは捕食の際に前脚を折りたたんで体を左右に揺らしたり、食後に前脚のカマの部分で舐めて掃除したり、前脚の内側の柔らかい毛の部分で複眼を拭いたり、といった動きを行う。フンコロガシは通常の歩行と、餌である糞を球状に固める動作、球にした糞を転がして移動する動きがある。寄生蜂は獲物を確保した際に、種によって針を刺す箇所が異なっていることが知られている [14]。

CG クリエーターによる手作業でこれらの動きのアニメーション作成を行う場合、膨大な労力と時間を要するため、制作費の関係から作り込みによるクオリティの向上や、多数のアニメーション作成を行えないのが現状である。昆虫のありのままの動きをデジタル昆虫図鑑に収録するためには、実計測による方法を取るより他にない。

実世界における 3 次元空間中の動きを時系列で取得する方法としてモーションキャプチャーが知られている。モーションキャプチャーには、主に光学式 [79, 80]、機械式 [81]、磁気式 [82]、機械学習 [83] の 4 方式があるが、これらをそのまま昆虫に適用することは難しい。何故ならば、前述の昆虫の動きは自然な環境で行われる行動であり昆虫は自由に動き回るため、光学式・磁気式モーションキャプチャーシステムでは撮影環境外に逃げた昆虫の観測ができなくなるといった課題がある。また、機械式モーションキャプチャーシステムはセンサー機構の重量が重いため、昆虫に取り付けるのは現実的でないそして昆虫は脚の長さ、頭の大きさなど多種多様であるため機械学習によるモーションキャプチャーの適用は難しい。

そこで本章では、ビデオカメラで撮影された 2 次元映像の各フレームから昆虫の関節の座標を手動で抽出して動きを取得する簡易モーションキャプチャーシステムを構築する。

5.2 簡易モーションキャプチャシステム

開発した簡易モーションキャプチャシステムは、2次元の動画像中から昆虫の関節などの特徴点を手動で抽出する作業、中心座標の固定や姿勢調整などの座標修正作業、アニメーション作成のためのガイド動画の出力、で構成される。

昆虫は、頭部、胸部、腹部の3つの部位で構成され、頭部には2本の触覚があり、胸に

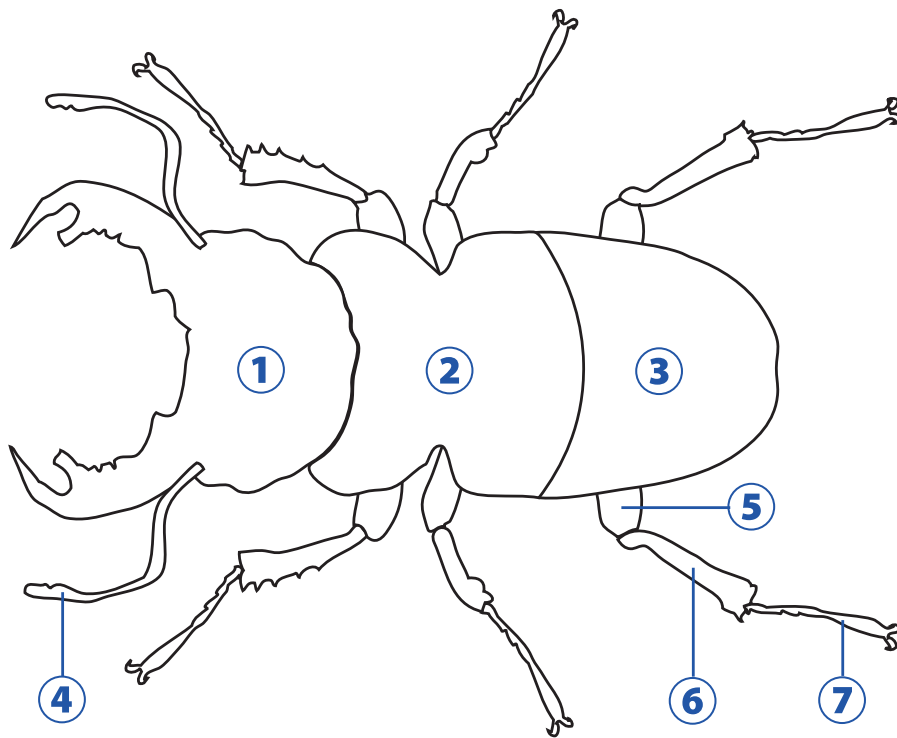


図 5.1: 昆虫の大まかな構造

①頭部、②胸部、③腹部、④触覚、⑤^{たいせつ}腿節、⑥^{けいせつ}脛節、⑦^{ふせつ}附節

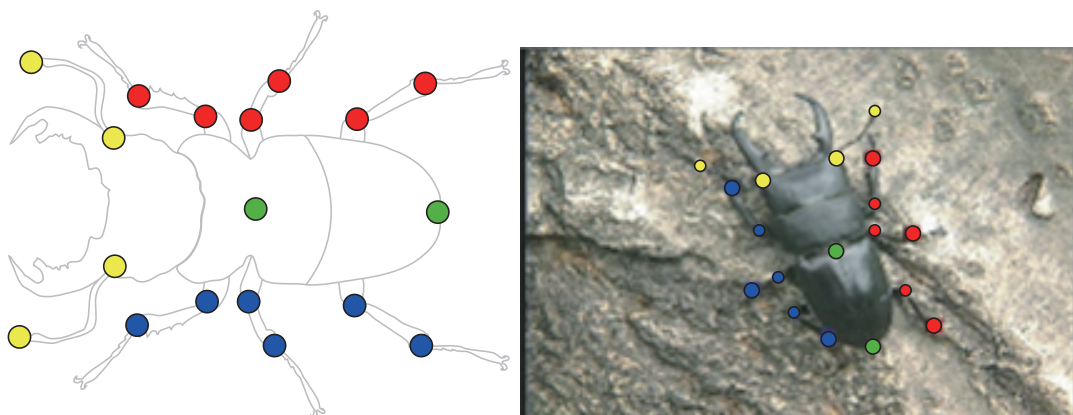


図 5.2: 動きを構成する関節 (左) と抽出結果 (右)。

●: 触覚の特徴点、●: 体の特徴点、●: 右脚関節の特徴点、●: 左脚関節の特徴点。

は6本の脚と4枚の翅を持つ(図5.1参照)。昆虫の構造より歩行の動きを構成するために必要な時間軸 t における特徴点として、触覚の動きを取得するための触覚の根本と先端、腹の動きを取得するための胸部中心と腹部先端、脚の動きを取得するための腿節と脛節の関節、脛節と附節の関節、の合計18箇所の特徴点が最低限必要である(図5.2参照)。

5.2.1 座標の手動抽出

はじめに、動画像の時間軸 t における各フレームから、表5.1に示す昆虫の動きを構成するために必要な特徴点の座標を手動で取得する。取得した特徴点の座標データを図5.3に示す。

一般的な甲虫であるクワガタムシ、カブトムシなどにおいては表5.1に示す18点の特徴点で概ね動きの取得が可能であるが、極端に脚の長い昆虫や、独特の歩行をする昆虫については、取得する特徴点の位置、数を任意に増やして対応することが可能である。

表 5.1: 手動で取得した特徴点 $P_{\text{部位},t}$

説明	記号
●: 右触覚根本の特徴点	$P_{\text{右触覚根本の特徴点},t}$
●: 右触覚先端の特徴点	$P_{\text{右触覚先端の特徴点},t}$
●: 左触覚根本の特徴点	$P_{\text{左触覚根本の特徴点},t}$
●: 左触覚先端の特徴点	$P_{\text{左触覚先端の特徴点},t}$
●: 胸部中央の特徴点	$P_{\text{胸部中央の特徴点},t}$
●: 腹部先端の特徴点	$P_{\text{腹部先端の特徴点},t}$
●: 右前足の腿節脛節間の特徴点	$P_{\text{右前足の腿節脛節間の特徴点},t}$
●: 右前足の脛節附節間の特徴点	$P_{\text{右前足の脛節附節間の特徴点},t}$
●: 右中足の腿節脛節間の特徴点	$P_{\text{右中足の腿節脛節間の特徴点},t}$
●: 右中足の脛節附節間の特徴点	$P_{\text{右中足の脛節附節間の特徴点},t}$
●: 右後足の腿節脛節間の特徴点	$P_{\text{右後足の腿節脛節間の特徴点},t}$
●: 右後足の脛節附節間の特徴点	$P_{\text{右後足の脛節附節間の特徴点},t}$
●: 左前足の腿節脛節間の特徴点	$P_{\text{左前足の腿節脛節間の特徴点},t}$
●: 左前足の脛節附節間の特徴点	$P_{\text{左前足の脛節附節間の特徴点},t}$
●: 左中足の腿節脛節間の特徴点	$P_{\text{左中足の腿節脛節間の特徴点},t}$
●: 左中足の脛節附節間の特徴点	$P_{\text{左中足の脛節附節間の特徴点},t}$
●: 左後足の腿節脛節間の特徴点	$P_{\text{左後足の腿節脛節間の特徴点},t}$
●: 左後足の脛節附節間の特徴点	$P_{\text{左後足の脛節附節間の特徴点},t}$

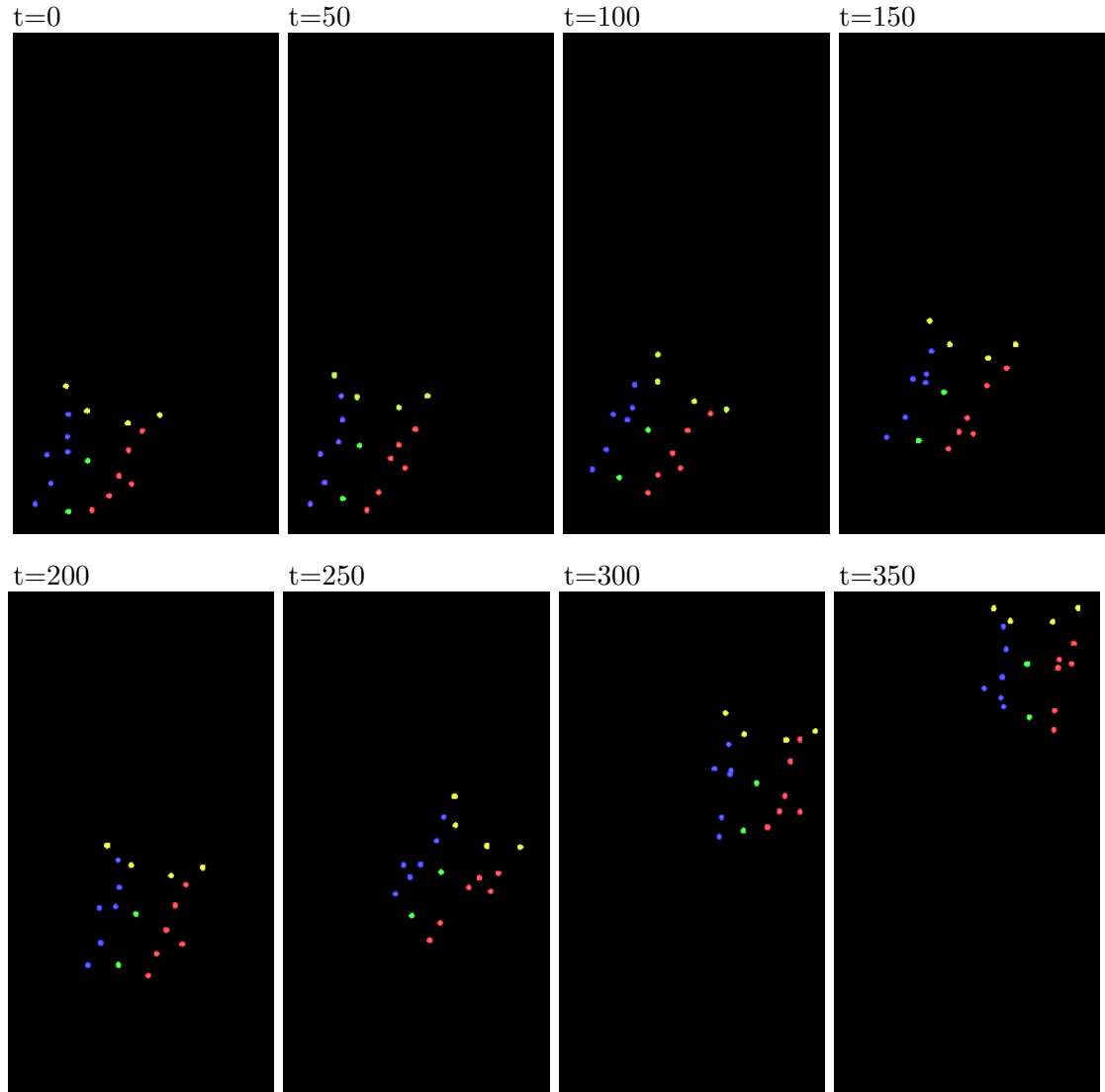


図 5.3: 手動で取得した特徴点の座標データ

5.2.2 特徴点座標の調整

次に、取得した特徴点座標の調整を行う。取得した座標には、カメラのブレや昆虫の歩行による移動成分や、昆虫の旋回運動による回転成分が含まれている。これら 2 つの成分は、アニメーション作成の邪魔となるため除去する。

移動成分の除去

取得した特徴点の座標 $\mathbf{P}_{\text{各部位},t} = [x_{\text{各部位},t}, y_{\text{各部位},t}]^T$ から、胸部中心の座標 $\mathbf{P}_{\text{胸部中心},t}$ を原点に固定することでカメラのブレや昆虫の歩行による移動成分を除去した特徴点の座標 $\mathbf{P}'_{\text{各部位},t} = [x'_{\text{各部位},t}, y'_{\text{各部位},t}]^T$ を各時間 t で得る。

$$\mathbf{P}'_{\text{部位},t} = \mathbf{P}_{\text{部位},t} - \mathbf{P}_{\text{胸部中心},t} \quad (5.1)$$

図 5.4 に、移動成分の除去処理を適用した座標データを示す。

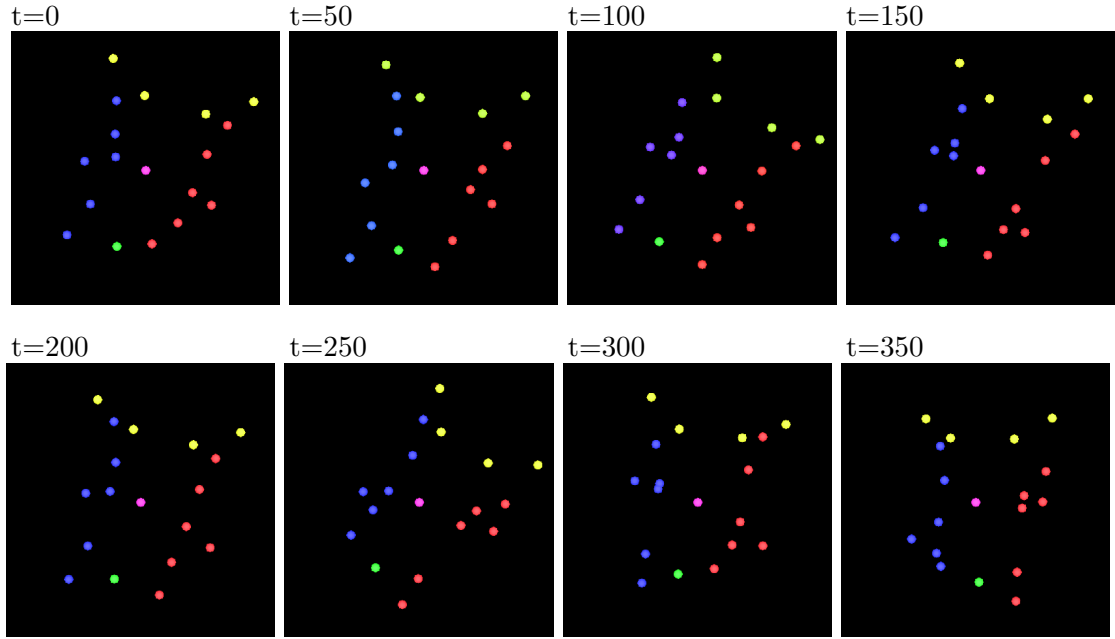


図 5.4: 移動成分を除去した座標データ

●: 固定された胸部中心の特徴点。

回転成分の除去

昆虫の歩行に伴う頭部、腹部の動きを残しながら、旋回運動による回転成分を除去する。まず、左右の触覚の根本の特徴点の中央点 $P'_{\text{触覚中点},t}$ を追加する。次に、追加した中央点、胸部中心の特徴点、腹部先端の特徴点を通る直線を最小二乗法から求め、その傾き θ_t が 90° になるように座標 $P'_{\text{各部位},t}$ を変換し、回転成分を除去した座標 $P''_{\text{各部位},t}$ を得る。

$$\begin{bmatrix} a_t \\ b_t \end{bmatrix} = (\mathbf{M}_t^T \cdot \mathbf{M}_t)^{-1} \cdot \mathbf{M}_t^T \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$\mathbf{M}_t = \begin{bmatrix} x'_{\text{触覚中点},t} & y'_{\text{触覚中点},t} \\ x'_{\text{胸部},t} & y'_{\text{胸部},t} \\ x'_{\text{腹部},t} & y'_{\text{腹部},t} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$\theta_t = \tan^{-1} \left(\frac{a_t}{b_t} \right) \quad (5.4)$$

$$\mathbf{P}''_{\text{各部位},t} = \begin{bmatrix} \cos(90 - \theta_t) & -\sin(90 - \theta_t) \\ \sin(90 - \theta_t) & \cos(90 - \theta_t) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{P}'_{\text{各部位},t} \quad (5.5)$$

図 5.5 に、回転成分の除去処理を適用した座標データを示す。

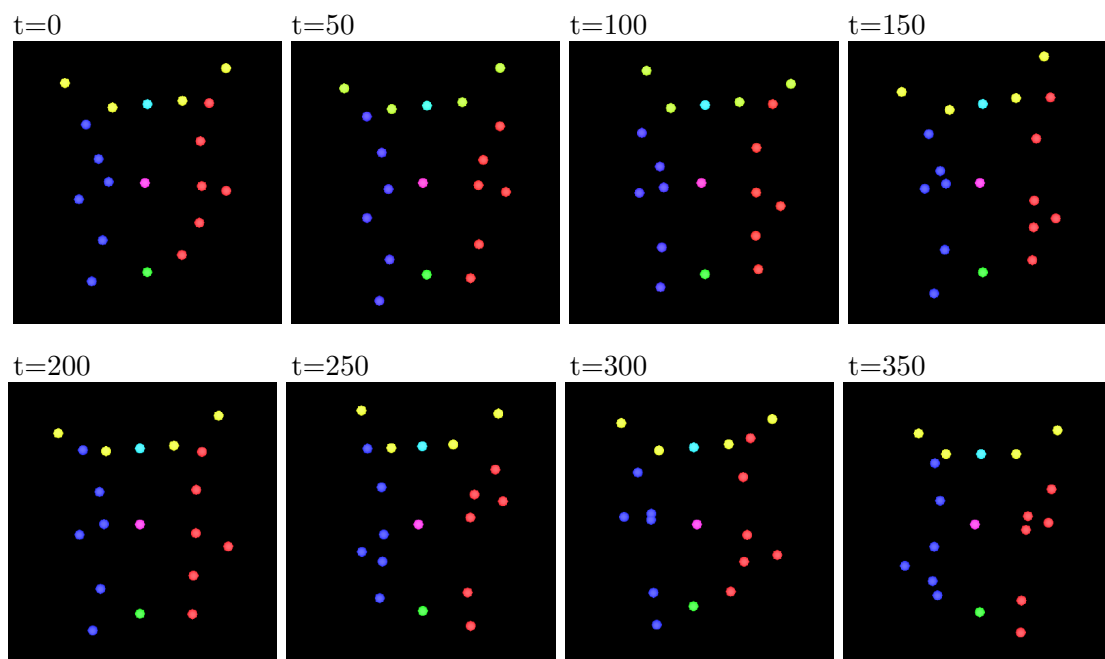


図 5.5: 回転成分を除去した座標データ

●: 追加した左右の触覚根本の中央点。

5.2.3 ガイド動画の出力

以上の作業で、手動で取得した特徴点の座標データの取得から、移動成分、回転成分の除去処理が完了した。最後に座標データ $P''_{各部位,t}$ を動画像形式で出力し、これをアニメーション作成時のガイド動画として使用する。

5.3 まとめ

デジタル昆虫図鑑を作成するために、動画像から特徴点を手動で取得し、座標調整を行い、アニメーション作成のためのガイド動画を出力する簡易モーションキャプチャーシステムの構築を行った。

提案手法は、自然環境で撮影した昆虫の動画像からモーション情報を取得し、自然環境下における昆虫動作をリアルに再現することに成功した。

第 6 章

実用と応用

本章では、デジタル昆虫図鑑のための昆虫 3DCG モデルの作成手順と図鑑展示システム、およびその応用について述べる。

6.1 コンテンツ作成

昆虫 3DCG モデルの作成手順として、データ取得、データ編集、アニメーション作成について述べる。

6.1.1 データ取得

本論文が実現した技術を用いて、昆虫の 3 次元形状モデル、テクスチャ、マテリアル情報（透過・拡散）、動きのモーションデータを取得する。3 次元形状モデル、テクスチャ、マテリアル情報（透過・拡散）は、観察点から見て表となる面の情報が取得されており、裏側は取得されない。そこで、あらゆる方向から測定を行い、CG で表現した際におおよそ全方向から見ても損失のないデータのセットを取得しておく。

6.1.2 3 次元形状モデルの修正

スリット型光源による 3 次元形状モデルの取得法は、スリットによる光の平面と平行な部位や窪んだ部位は十分な光が届かないため、計測不良により穴が開いたような状態となる。この穴は後の合成作業において問題となるため、まずはじめに穴の修正作業を行う（図 6.1 参照）。

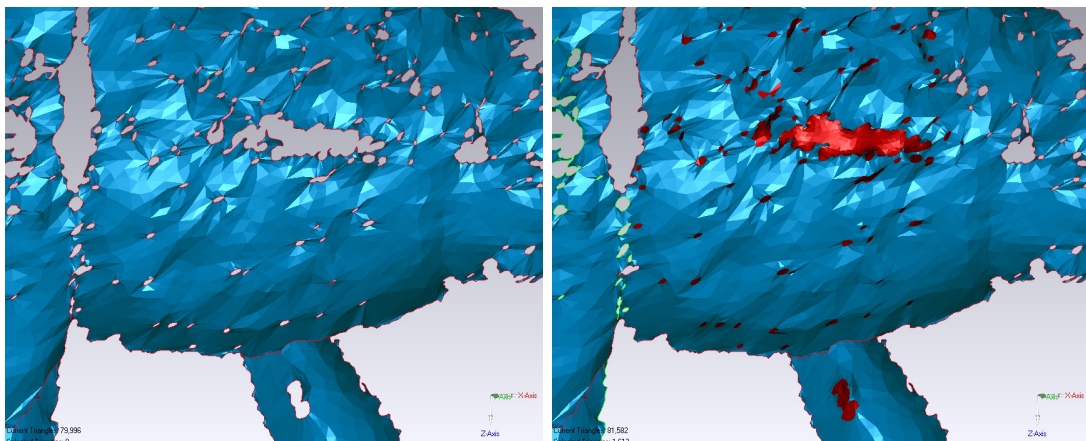


図 6.1: 3 次元形状モデルの修正
穴の修正前（左）、穴の修正後（右）

6.1.3 3次元形状モデルの合成

つぎに取得された複数のデータセットについて、3次元形状モデルの合成作業を行う。合成にはGeomagic Studio（市販ソフトウェア）を用いて、データセット間で3次元形状モデルが連結するように合成する。

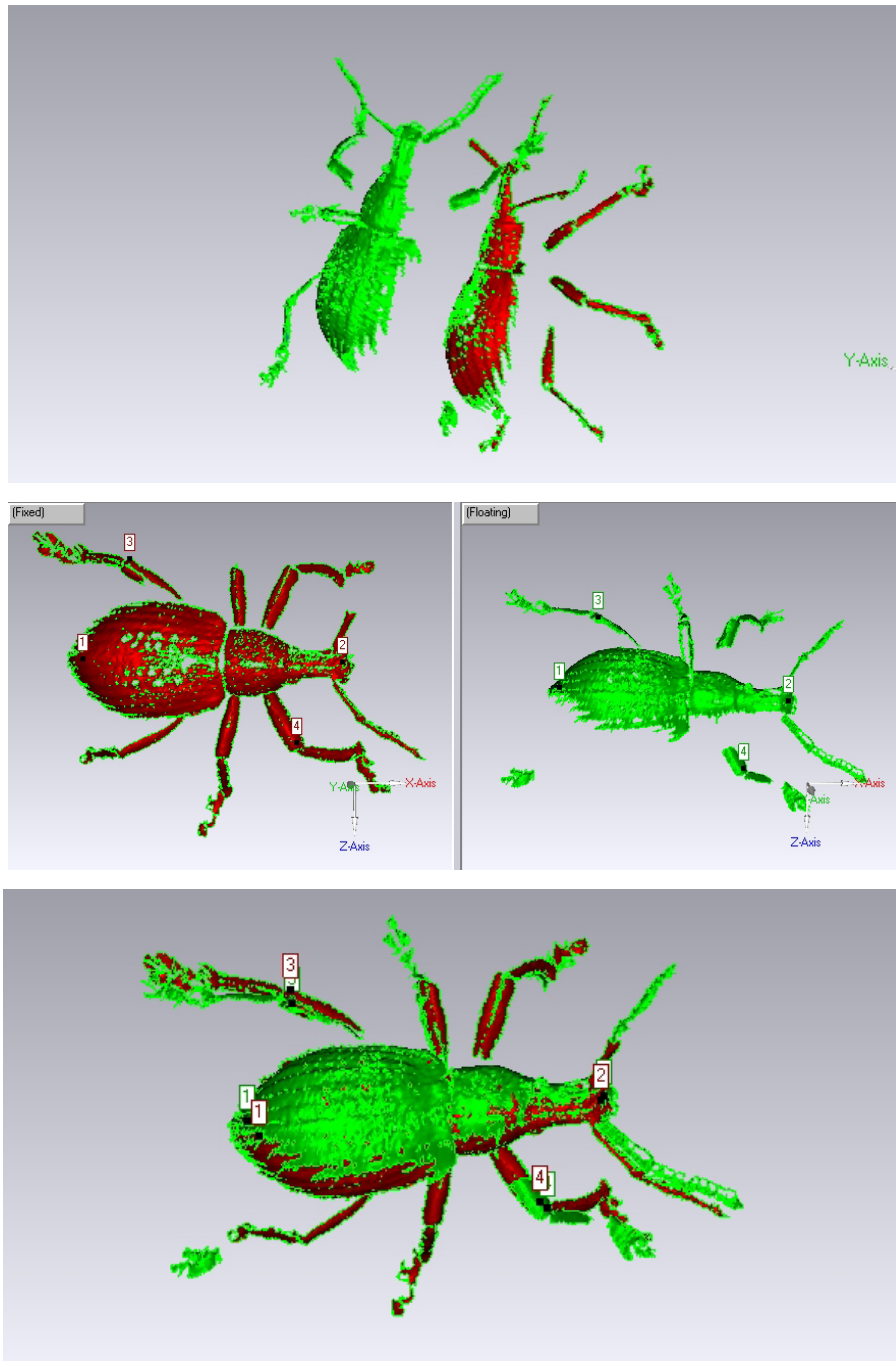


図 6.2: 3次元形状モデルの合成

3次元形状モデル（赤、緑の2種）の位置合わせ前の様子（上）、
4点を指定し位置合わせを開始（中）、3次元形状モデルの位置合わせが完了（下）。

6.1.4 テクスチャの再適用・境界調整

次に Lightwave (市販ソフトウェア) を用い、必要箇所にテクスチャ・マテリアル情報を再適用する。合成された 3 次元形状モデルに再適用したテクスチャは、照明位置の関係からデータセット間の境界で色合いが大きくことなるため、これを目立たないように Body Paint (市販ソフトウェア) を用いて修正する。これにより、昆虫の CG モデルが完成する。



図 6.3: テクスチャの境界調整

胸部、体のテクスチャ境界修正前(上)と、テクスチャ境界修正後(下)

6.1.5 アニメーションの作成

第5章で出力されたガイド動画を用いて、昆虫のCGモデルにアニメーションを付加する。ガイド動画には高さ情報は含まれないが、例えば脚の長さは固定のため、特徴点間の距離から手前あるいは奥行き方向に脚などが傾いているが分かる。この情報を基に、奥行きについては手作業で指定していきアニメーションを付加する。アニメーション付加にはLightwave、Anark Studioなどの市販ソフトウェアを用いた。

作成したカミキリムシ、クワガタムシ、ゾウムシのアニメーションを付録Aに示す。

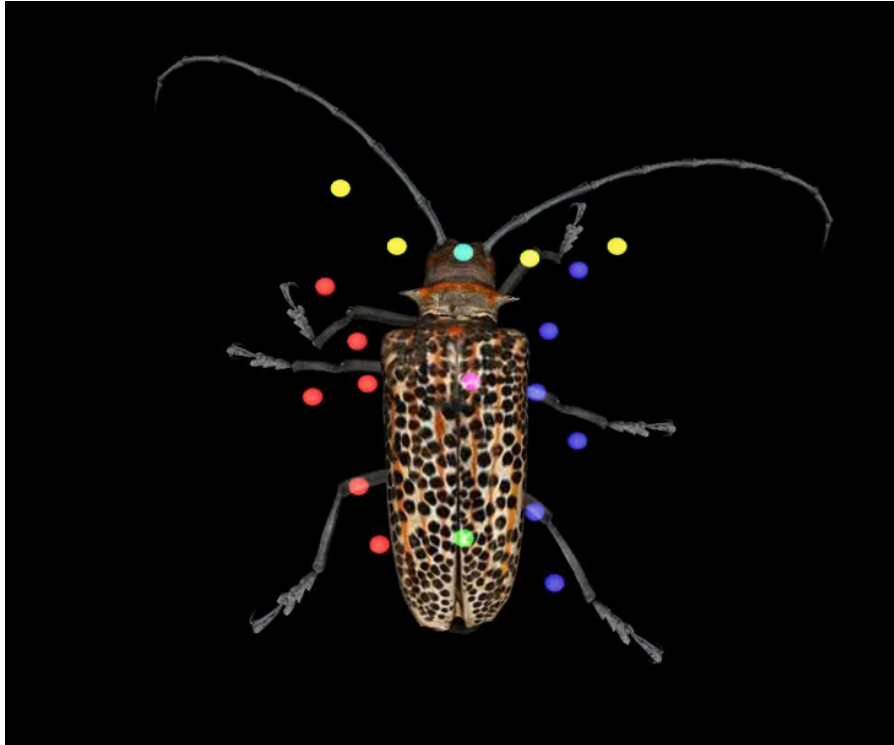


図 6.4: アニメーションの作成

6.2 デジタル昆虫図鑑の開発・展示

実現した技術を用いて作成した 3DCG モデルを用いて、次の 4 種のデジタル昆虫図鑑を開発し、公開・展示を行った。

6.2.1 web デジタル昆虫図鑑

作成した昆虫図鑑を web 上から閲覧できる web デジタル昆虫図鑑として公開した。本 web デジタル昆虫図鑑では、メンガタクワガタムシ、ハウセキゾウムシ、カミキリムシ、コノハムシ、エゴヒゲナガゾウムシ、シロチョウの 6 種の昆虫と、試験的に作成した矢尻、どんぐり、オカリナのコンテンツを掲載した。マウス操作により、対象を回転させて閲覧することができる。メンガタクワガタムシ、ハウセキゾウムシ、カミキリムシはアニメーションモードにより、その方向の様子を閲覧することができる。

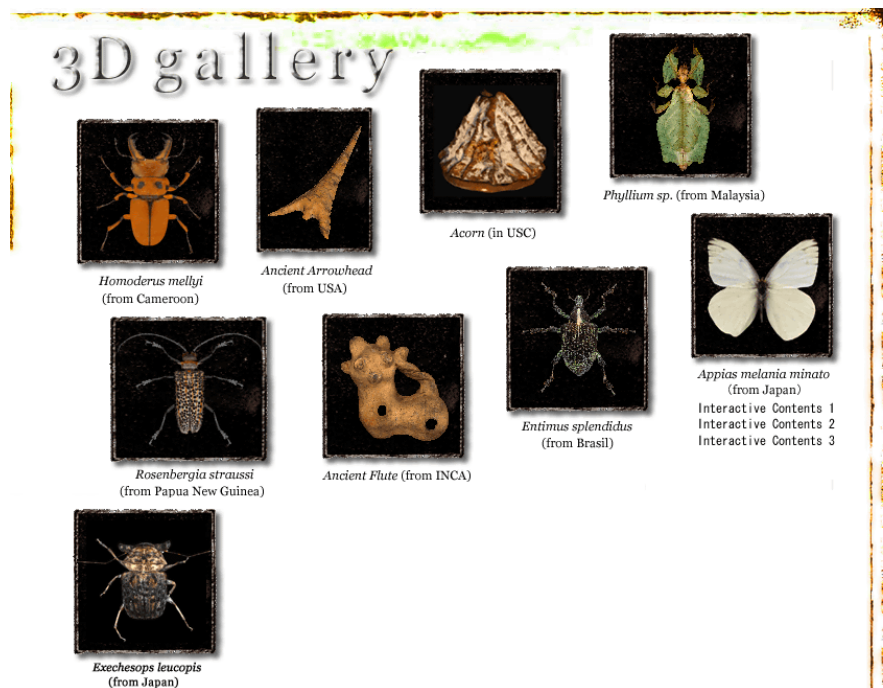


図 6.5: web デジタル昆虫図鑑

6.2.2 成長過程を扱ったデジタル昆虫図鑑

木の実の種のなかで生活する昆虫の成長過程を X 線 CT 装置を用いて観察し、閲覧可能とした図鑑の作成を行った。X 線 CT 装置では実在物の色情報を取得できない。そこで人間の目に触れる外側の 3 次元形状モデルとテクスチャを本研究が提案する技術を用いて取得し、内部の情報は X 線 CT 装置によって取得されたボリウムデータから断面を生成し閲覧する可視化の手法を実現し、コンテンツ開発を行った。

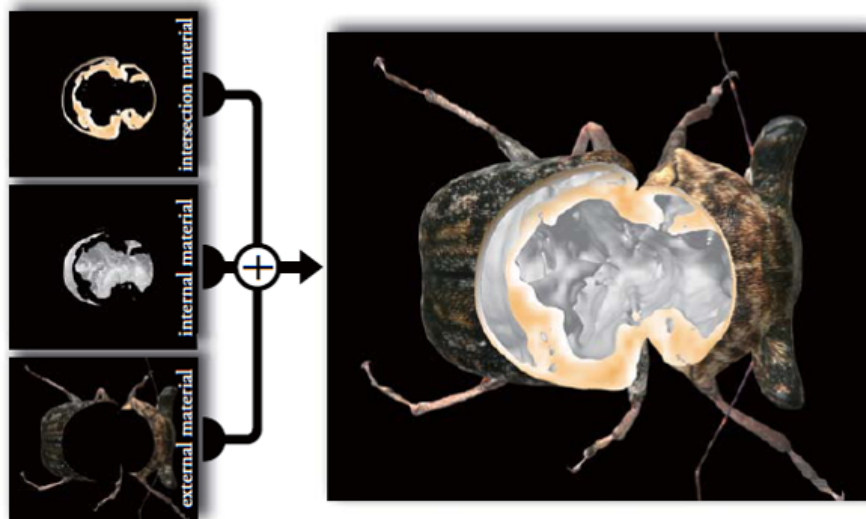


図 6.6: X 線 CT 計測で得られたボリュームデータを用いた可視化

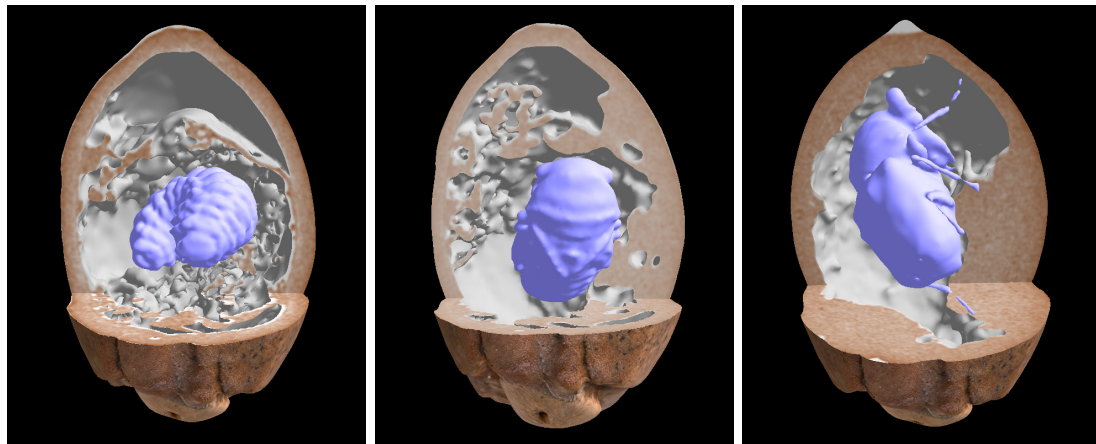


図 6.7: エゴヒゲナガゾウムシの成長観察

展示したエゴヒゲナガゾウムシの成長観察を図 6.7 参照) に示す。博物館・科学館展示の際には、普段見ることのできない生物の営みを知ることができ大変興味深かった等、コメントが寄せられている。

6.2.3 インタラクティブ・デジタル昆虫図鑑

博物館・科学館での実際の展示に際し、来館者が自由に操作できる参加型システムとして、入力にゲーム用ジョイスティック・ボタンを試用したインタラクティブ・デジタル昆虫図鑑を開発、展示を行った。図 6.8 にシステムのアウトラインを示す。

作成した展示物を図 6.9 に示す。

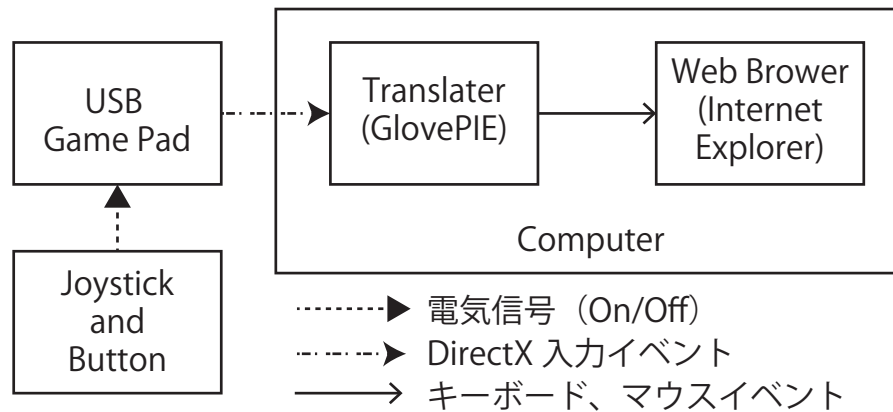


図 6.8: インタラクティブ・デジタル昆虫図鑑システムのアウトライン
 ジョイスティック、ボタンの On/Off 信号を市販の USB ゲームパッドへ接続、
 パソコンで受信した DirectX Input 情報をフリーソフトウェア GlovePIE を
 用いてキーボード・マウスイベントに変換する。
 変換されたイベントを Web ブラウザが受け取り、昆虫 3DCG モデルを操作する仕組み。



図 6.9: インタラクティブ・デジタル昆虫図鑑
 作成した展示システム（左）、来館者が操作している様子（右）

6.2.4 ステレオ 3D デジタル昆虫図鑑

昆虫コンテンツは 3 次元の形状を有しているため、立体視での閲覧により、その形状の特徴をより視覚的に認識できる可能性がある。そこで、これまでの昆虫図鑑を統合し、上映用のステレオ 3D デジタル昆虫図鑑を作成した。

ステレオ 3D 映像にはいくつかの注意事項があり、これらを考慮せずに制作された作品を放映すると、立体視酔い、3D 酔いと呼ばれる現象を招く恐れがある。ステレオ 3D デジタル昆虫図鑑の作成では、特に次の 3 点に注意し、ステレオ 3D 映像の制作を行った。

動きの早いシーンへの対処

ステレオ 3D 映像では、動きの早いシーンは試聴し難いと言われている。ステレオ 3D デジタル昆虫図鑑の作成では、やむを得ず動きの早いシーンを組み込む際には、ブラー効果と呼ばれるぼかしの技術を用いることで、この問題に対処した（図 6.10 参照）。



図 6.10: ステレオ 3D 映像制作における動きの早いシーンへの対処
元映像（左）、ブラー効果を適用（右）

拡大表示への対処

ステレオ 3D 映像では、スクリーンの内側よりも外側に飛び出した映像のほうが迫力・インパクトがあるものとして一般の試聴者に好まれる。しかしながら、放映するスクリーンのサイズを超えて昆虫を拡大表示する場合、スクリーンの外に飛び出す演出は立体視酔いを招く恐れがある。ステレオ 3D デジタル昆虫図鑑の作成では、昆虫の全体像が映るシー

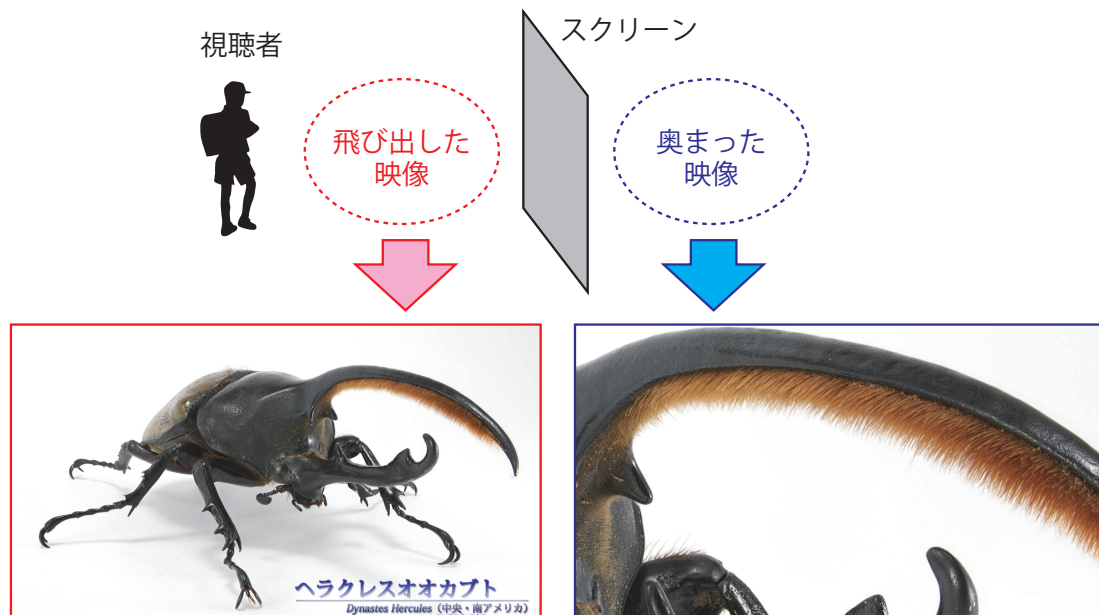


図 6.11: ステレオ 3D 映像制作における拡大シーンへの対処
昆虫の全体像が映るシーンではスクリーンから飛び出す演出を選択、
一部を拡大するシーンでは奥まった演出を選択。

ンではスクリーンの外側へ飛び出す演出を、一部を拡大するシーンはスクリーンの内側に表示する演出を行った（図 6.11 参照）。

クロストーク低減のための対処

ステレオ 3D 映像では、手前に表示される物体と背景のコントラストが大きい場合、右目に左目の映像が見えたり、またその逆が起こるクロストークと呼ばれる現象が現れる。ステレオ 3D デジタル昆虫図鑑の作成では、図 6.12 に示すように、昆虫と背景のコントラストが低くなるように映像を作成することで、クロストークを低減するための対処を行った。



図 6.12: クロストーク低減のための対処
黒背景で作成した映像（左）、グレー背景で作成した映像（右）

作成したステレオ 3D デジタル昆虫図鑑のシナリオを、付録 B に示す。

6.3 生物への応用

昆虫以外への応用として生物を対象とした「中身が見える！3D 生物図鑑」を独立行政法人 理化学研究所 VCAD システム研究プログラム 生物基板構築チームと共同で開発した [114]。本図鑑は、理化学研究所画像情報処理研究チームで開発している 3 次元内部構造顕微鏡 [115] を用いて取得された生物の断面画像群（図 6.13 参照）を内部の断面画像として使用し、外側を本研究の技術で取得したテクスチャを利用して作成したコンテンツである。3 次元内部構造顕微鏡で取得した断面画像群から生成したテクスチャと、本論文の技術を用いて作成したテクスチャを適用した 3DCG モデルの比較を図 6.14 に示す。本研究の技術によるテクスチャを用いることで、リアルな亀らしい表現に成功した。

中身が見える！3D 生物図鑑の可視化部分は、成長過程を扱ったデジタル昆虫図鑑のボリュームデータをカラー対応可することで実現している（図 6.15 参照）。

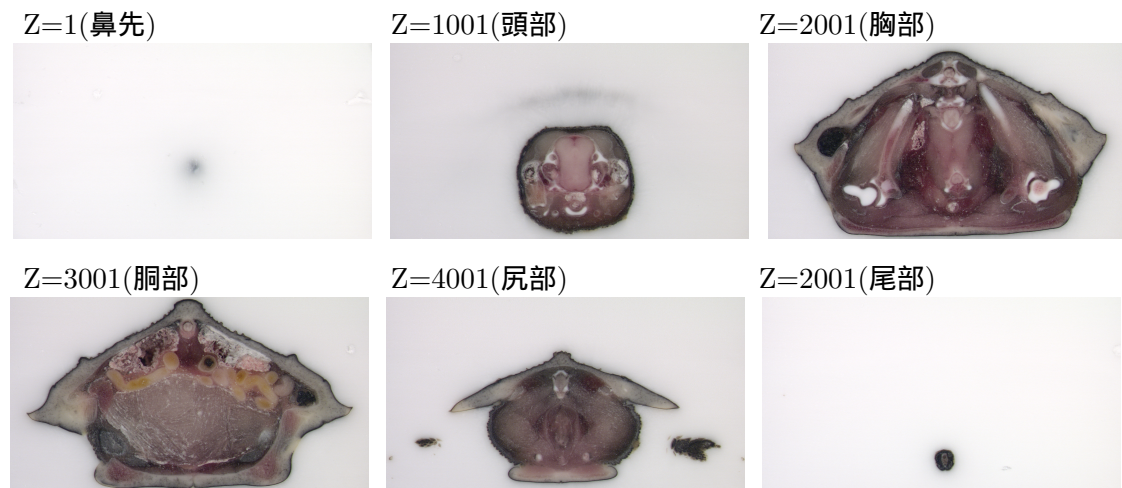


図 6.13: 3 次元内部構造顕微鏡で取得された断面画像

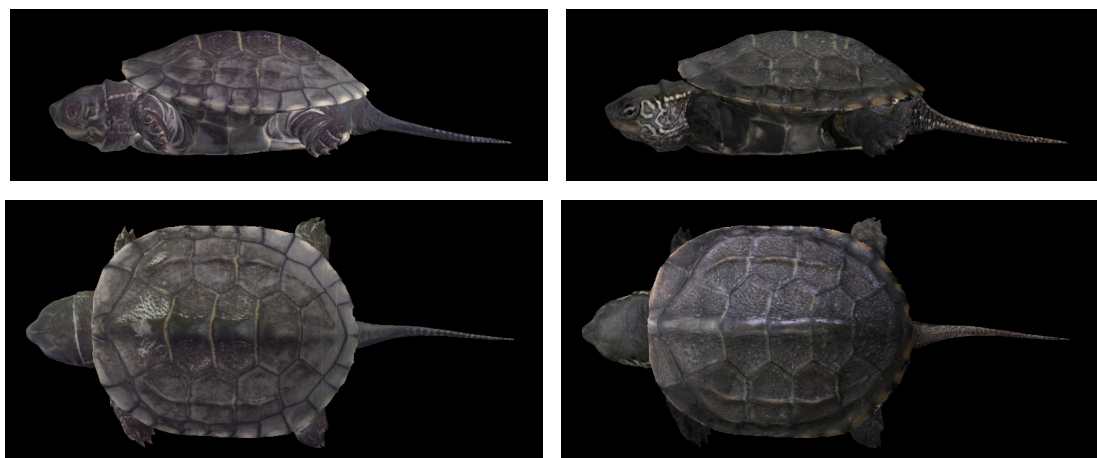


図 6.14: 本研究の技術によるテクスチャのあり / なしの比較
3 次元内部構造顕微鏡によるテクスチャを適用した亀（左上、左下）
本研究の技術によるテクスチャを適用した亀（右上、右下）

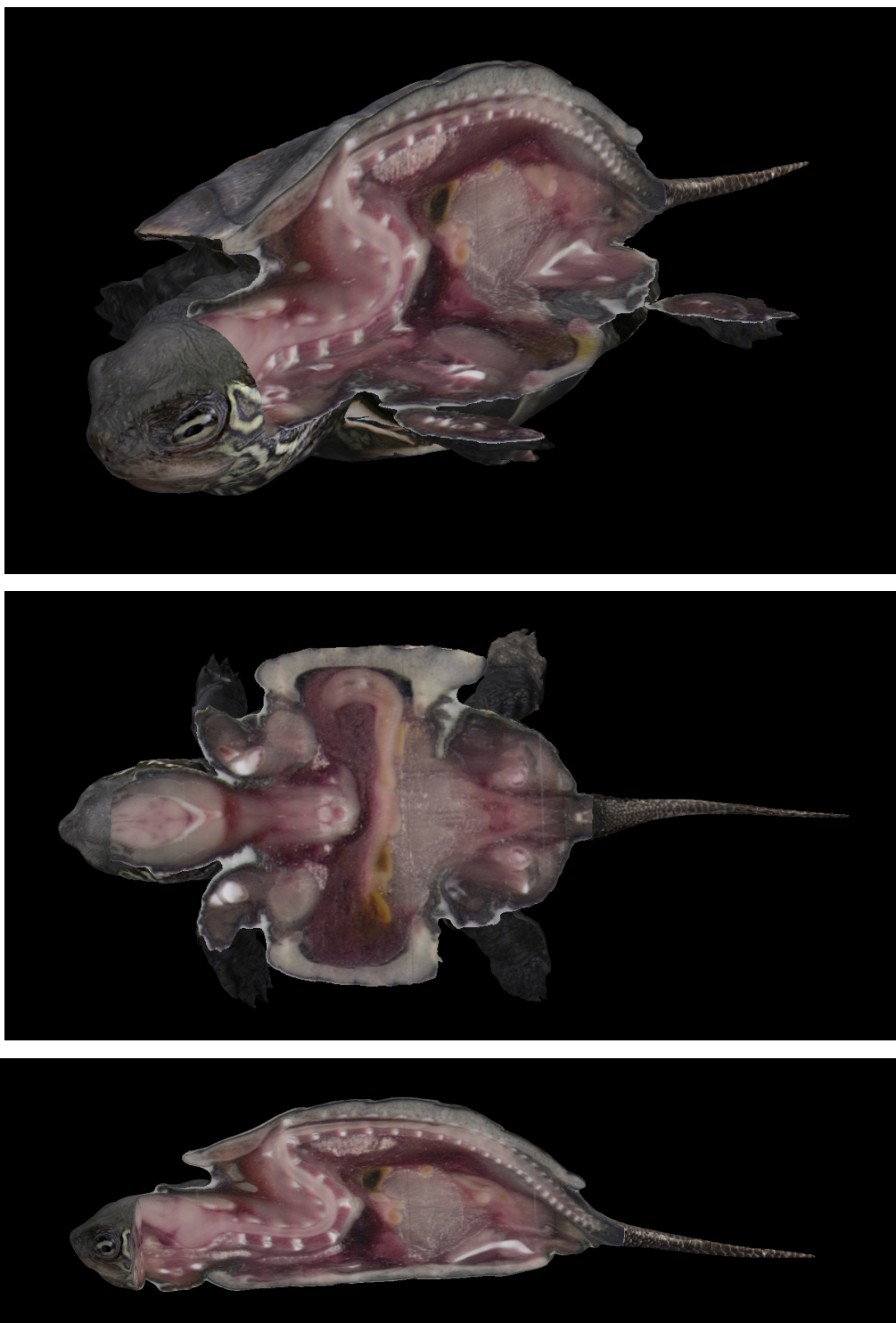


図 6.15: 中身が見える！生物図鑑

6.4 工業・製造業への応用

インタラクティブ・デジタル昆虫図鑑の応用として、理化学研究所理研ギャラリーの常設展示物の制作を、独立行政法人 理化学研究所 広報室、VCAD システム研究プログラム 普及推進チーム、生物基板構築チームと共同で行った。理研ギャラリーは理化学研究所における研究成果を展示するスペースであり、本取り組みはVCAD システム研究プログラムの成果の一部を紹介する展示物の作成である。エンジンブロックの X 線 CT 計測、および強度解析シミュレーションの適用結果¹などのコンテンツを、来場者が自由に閲覧することができる（図 6.16 参照）。

開発した常設展示システムの図面を付録 C に示す。



図 6.16: VCAD システム研究プログラム 常設展示システム
装置外観（左上）、操作パネル（右上）、
強度解析シミュレーション結果（左下）、解説文（右下）

¹独立行政法人 理化学研究所 VCAD システム研究プログラム 普及推進チームにおいてエンジンブロックの X 線 CT 計測、および強度解析シミュレーションを実施。

6.5 展示・評価

本研究成果の有効性を確認するために、博物館・科学館において展示を通して評価を行った。本論文の成果を用いて行った展示の一覧を付録 D に示す。

展示を通して得られたコメントをまとめる。20代以上の女性からは、「綺麗」という意見と「気持ち悪い」という意見に別れる特徴があった。20代以上の男性からは、「今まで見たことのないクオリティーのCG」、「どうやって作成しているのか」といった技術的な興味が多く見て取られた。小学校高学年の男児・女児からは、「どこにこの昆虫はいるのか」、「いつ頃捕まえられるのか」といった活発な反応が得られた。小学校低学年では、女児は高学年と同様に活発な反応が得られたが、一部の男児は非常に怯えたことが印象的であった。

第 7 章

未来の図鑑

本章では、これまでのデジタル昆虫図鑑に関する技術や実用化を踏まえ、これからのデジタル図鑑の可能性として、図 7.1 に示す、生息している生き物を探し出す自然環境の情報を利用した図鑑、いつでもどこでも同定・学習を支援するための携帯型端末を利用した図鑑、対象物の認識を支援するための 3D 造形技術を利用した図鑑、子供・初心者が興味を持って学習するための 3D 図鑑、研究者が研究をするために必要な情報を有した研究用図鑑について述べる。

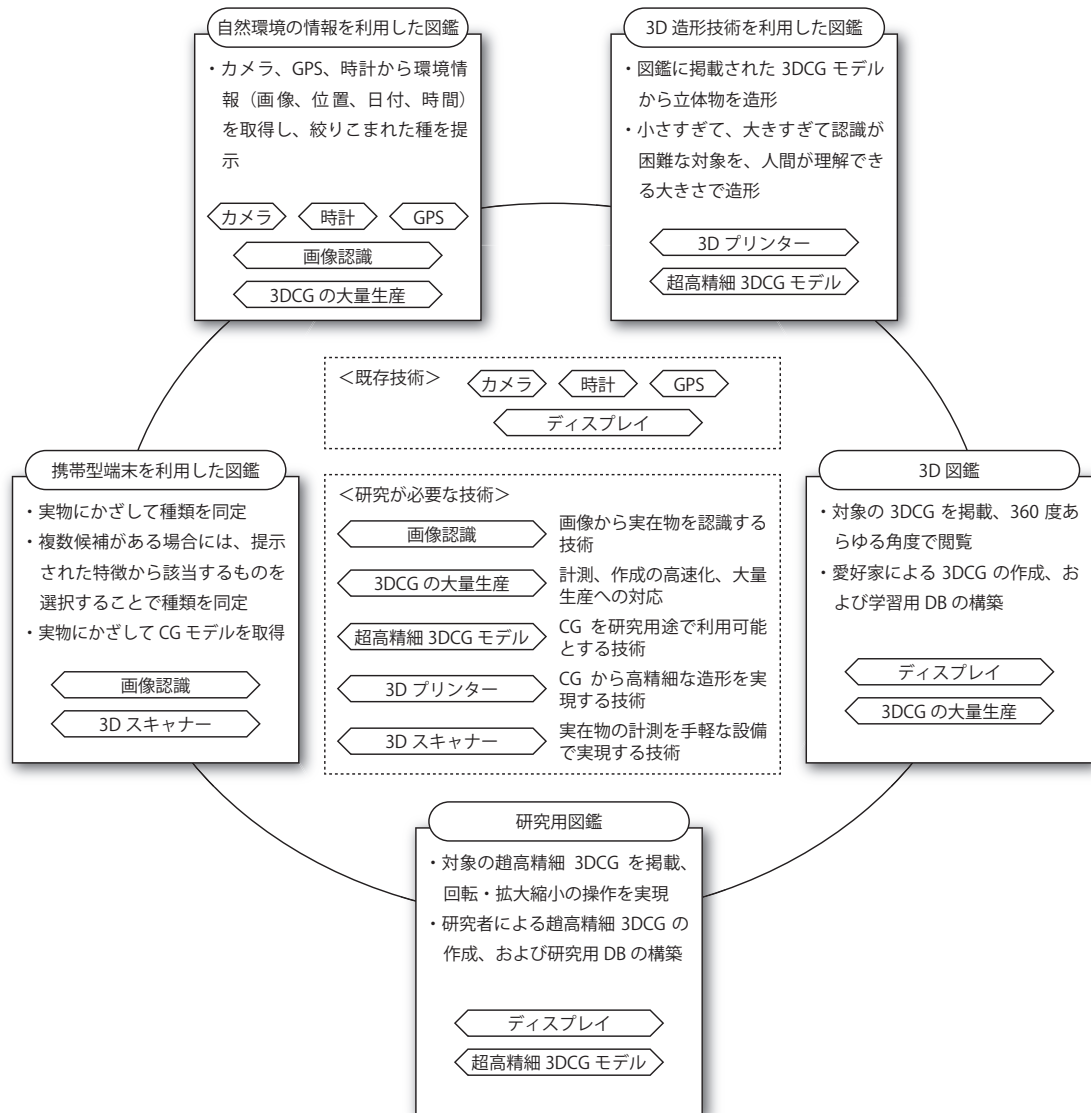


図 7.1: デジタル図鑑の未来

7.1 自然環境の情報を利用した図鑑

ヘッドマウント・ディスプレイ (HMD) とカメラ、グローバル・ポジショニング・システム (GPS)、3次元ポインティングデバイスで構成されたシステムを用い、取得した環境情報から DB 上の関連情報を取得し、実映像上に CG で提示することで現実を仮想現実で拡張する技術を実現した研究 [116, 117] は、デジタル図鑑の未来に強く関係する研究であると考えられる。図 7.2 に示すように、樹木に付けられた情報タグをクリックすると、その樹木に関係した生物の情報が表示される仕組みである。

将来、画像処理技術の発展により自然物などの実物体の自動認識が可能になると、図 7.3 に示す自然環境の情報を利用した図鑑の可能性が予想される。カメラなどの画像入力装置によって取得された画像から植物、花、樹木を認識し、GPS によって得られる位置情報、時計によって得られる日付、時間などの情報や、各種センサーによって得られた情報を元に検索を行い (図 7.3 の a)、その植物、花、樹木に生活している生物を提示 (図 7.3 の b)、対象が複数の場合は、利用者が甲虫目やハムシ上科といった条件を追加することで絞り込みを行い (図 7.3 の c)、対象物の 3DCG モデルを HMD に表示するなどの環境情報を利用した図鑑の出現が期待できる。

自然環境の情報を利用した図鑑を実現するためには、図 7.1 に示す、カメラ、時計、GPS、



図 7.2: 環境情報を利用した VR システム

HMD およびカメラ (左上)、システムを装着した図 (右上)
HMD 上に映しだされたアイコン (左下)、生息する昆虫の情報 (右下)

ディスプレイなどの既存技術に加え、画像から実物体を認識する手法の確立や、図鑑に掲載する植物、花、樹木などの3DCGモデルの大量作成を実現する必要がある。本論文が確立した3次元形状モデルとテクスチャの取得法を植物、花などの柔らかい対象にそのまま適用することは困難であるが、多方向からの同時計測やサンプルの固定法などの拡張により適用の可能性が考えられる。

本論文の技術を用いた3DCGモデルの作成ばかりでなく、作成された3DCGモデルと写真の比較による自動認識技術などへの貢献が期待できる。

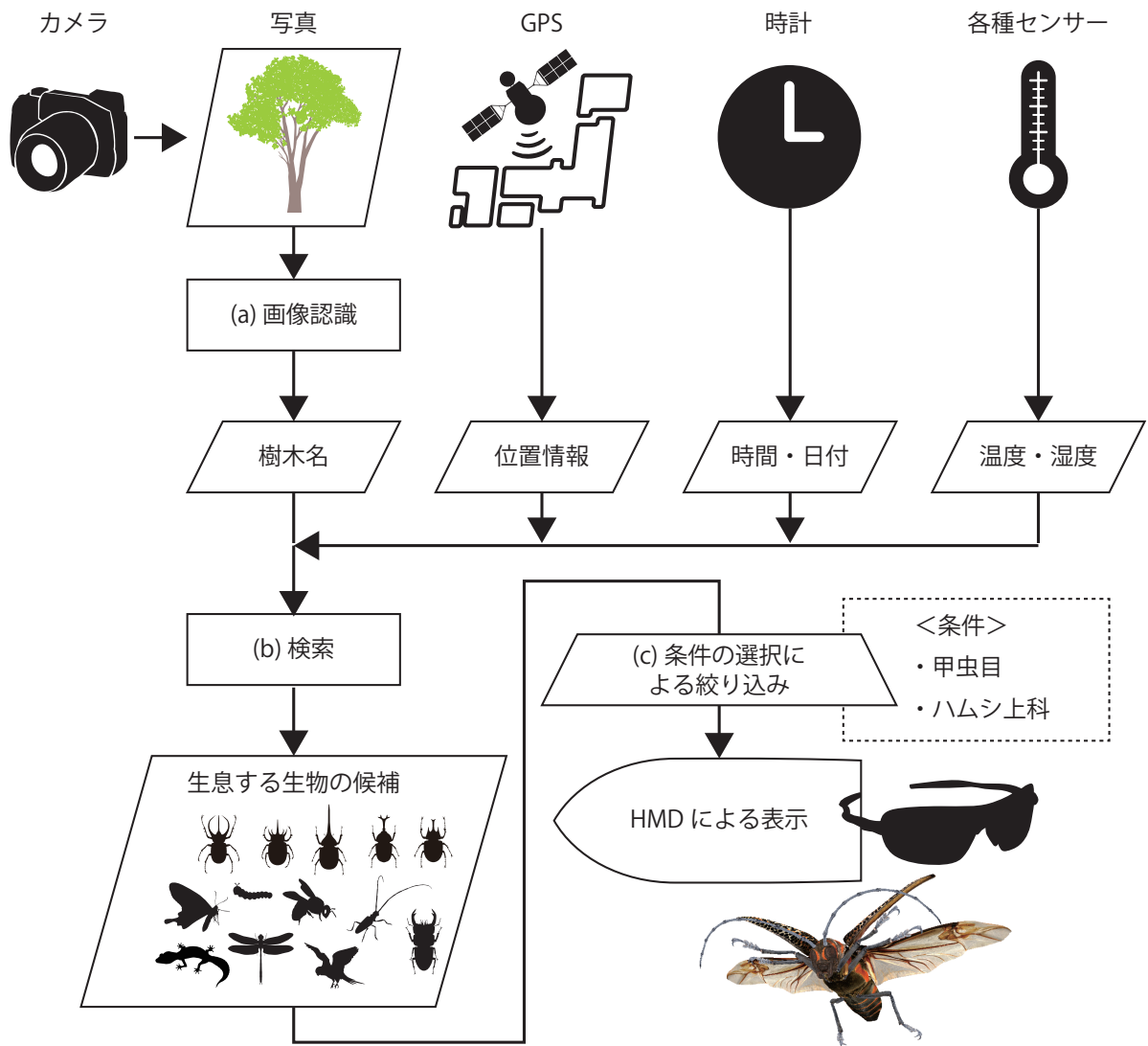


図 7.3: 自然環境の情報を利用した図鑑

7.2 携帯型端末を利用した図鑑

スマートフォン、携帯型ゲーム機の普及を背景に、いつでもどこでも対象物の同定や学習を行うことを支援する身近なツールとしての図鑑の実現が予想される。昆虫を対象とした図鑑では、例えば QR コードの読み取りと同じ要領でカメラを搭載した携帯型端末を昆虫にかざすと画像が撮影され（図 7.4 中の a）、撮影された画像を基に画像認識技術によって検索を行い（図 7.4 中の b）、候補が複数ある場合には「口器が長い」などのテキストとその映像を 3DCG で表示し選択することで絞り込みを行い（図 7.4 中の c）、同定を支援する（図 7.4 中の d）システムの実現が考えられる。

従来、同定には検索表が用いられたが、昆虫に対する知識を有していない初心者や子供にとって、肩後剛毛と言われてもどの部位のことを指しているのか全くわからず同定が行えない、といった問題がある。未来の図鑑では、専門的な知識を有しなくても実物と 3DCG の比較から同定を支援するなどの仕組みが必要と予想する。

これらの機能を実現するには、図 7.1 に示す、画像から実物体を認識する技術の確立や、実物体の 3DCG モデルを少ない手順で取得する 3 次元スキャニング技術の実現が必要であ

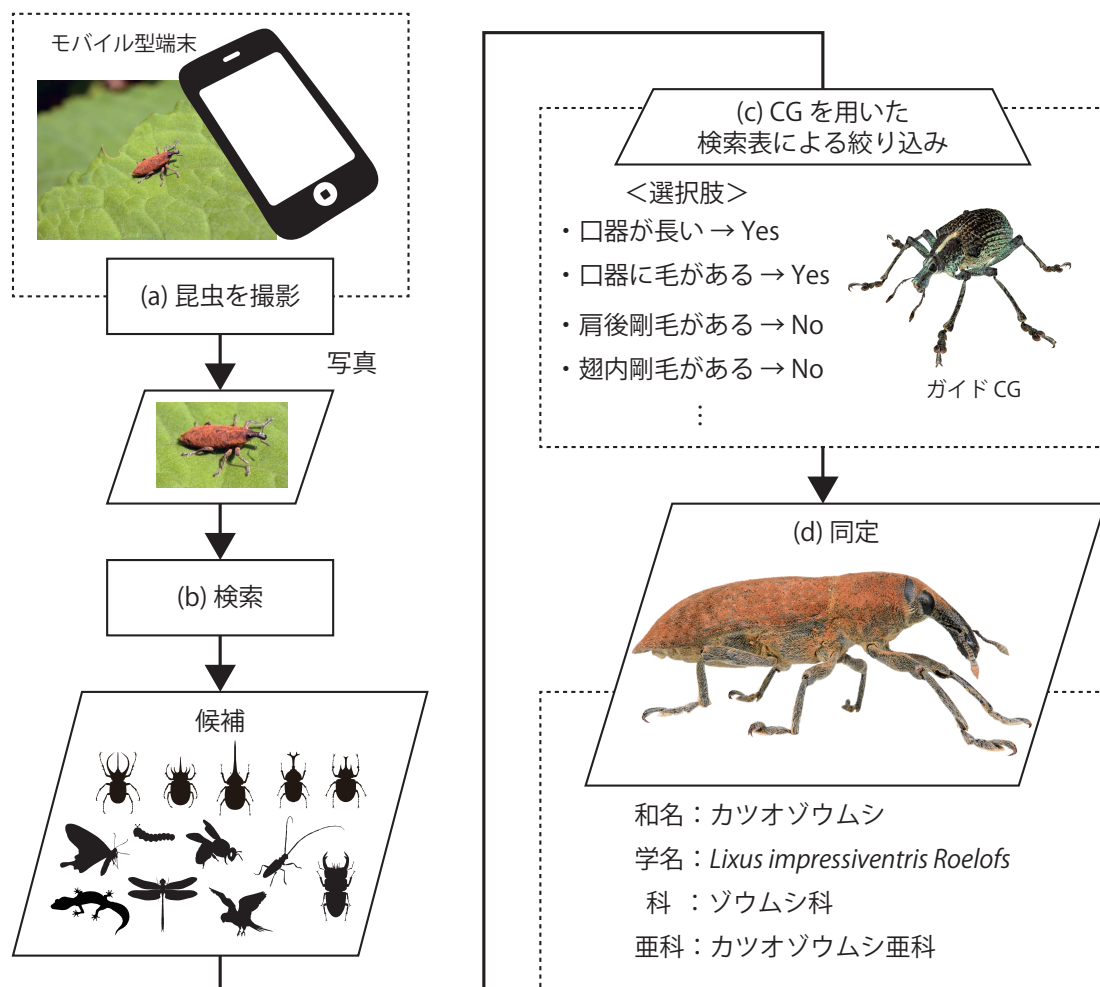


図 7.4: モバイル型端末を利用した図鑑

ると考えられる。

本論文の技術を用いた 3DCG モデルの作成ばかりでなく、作成された 3DCG モデルと写真の比較による自動認識技術などへの貢献が期待できる。

7.3 3D 造形技術を利用した図鑑

3DCG を掲載した図鑑では、3D プリンターを利用することで CG データから 3 次元造形を行うことが可能となると予想される。これにより教育・研究の現場においての図鑑の利活用が期待できる。

検索サービスと 3D プリンターを組み合わせた取り組み [118] はすでに行われており、音声により入力されたキーワードを基に検索を行い、指定したデータの樹脂造形出力が可能である。主に視覚障害者を対象とした特別支援学校において活用されている。

人間は、自身のサイズに比べてあまりに小さすぎるものの詳細や、大きすぎるものの全体像を認識することが困難である。

クワガタムシはその大きさから目の前に存在していることは認識できるが、肉眼では見ることのできない微細な 3 次元形状やテクスチャといった情報を人間が得ることは難しい。また輪形動物などの微生物は肉眼では存在を認識することすら困難であるため、人間が微細な 3 次元形状やテクスチャを認識することは困難である。逆に城などの建築物は、存在

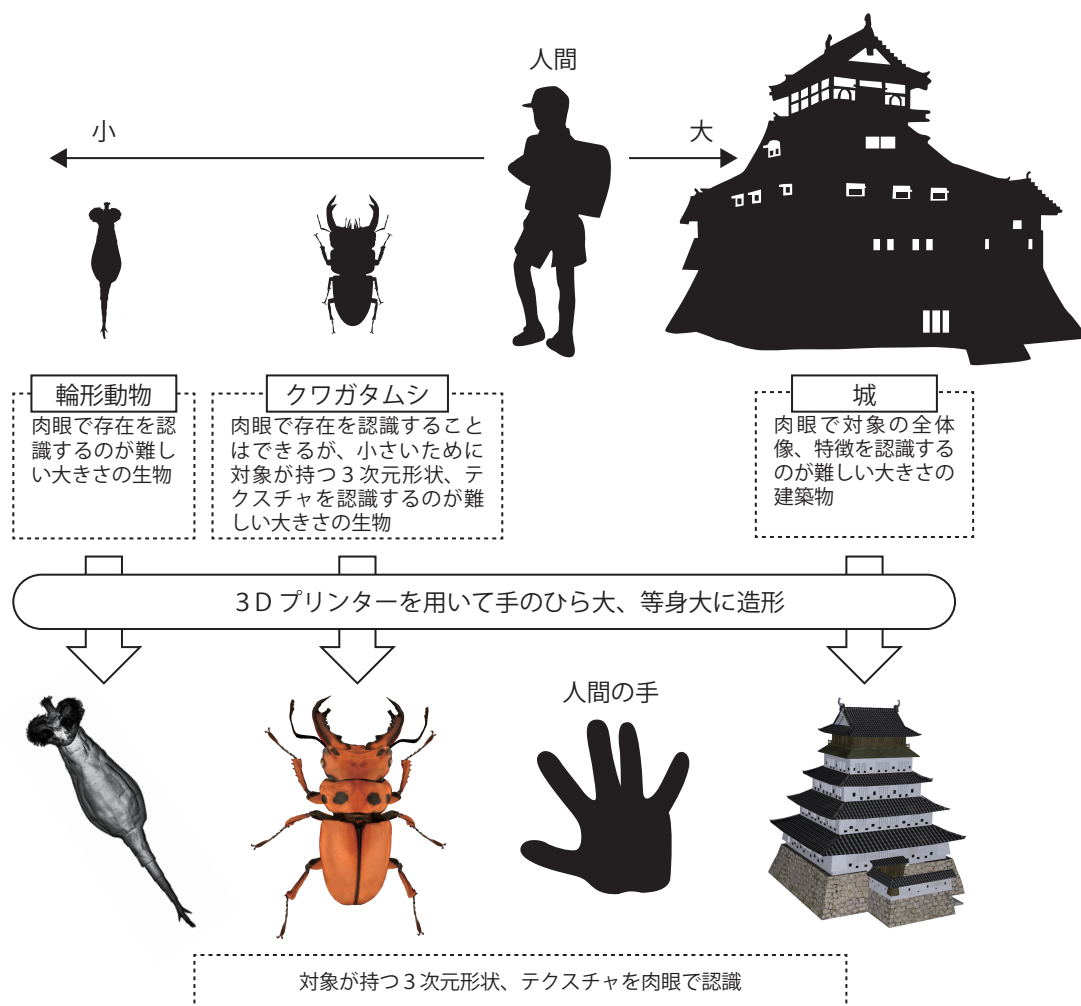


図 7.5: 3D 造形技術を利用した図鑑
画像出典：輪形動物の画像は Wikipedia からの転載

は認識できるがその全体像や3次元形状の特徴などを直感的に理解することは難しい。そこで、図 7.5 に示すように、図鑑に掲載された CG を手のひら大、等身大などの人間が触れられる大きさに造形することで、実物体の認識・理解を深めることが可能になると予想される。

3D 造形技術を利用した図鑑を実現するには、図 7.1 に示す、精細な色表現や、細かい凹凸、毛などを微細構造物の造形などに対応した超高精細 3D プリンターや、その造形に必要となる情報を有した超高精細 3DCG モデルを作成する技術が必要である。本研究が実現した 3 次元形状モデルの取得技術を拡張することで、超高精細 3D プリンターの入力となる超高精細 3DCG モデルの作成に応用・貢献が期待できる。

7.4 3D 図鑑・研究用図鑑

実物体の 3DCG を図鑑に掲載することで、自由な視点方向からの観察や拡大・縮小しての観察が可能となる。これにより子供、初心者、入門者に対し学習・啓蒙を効率的かつ持続的に行える可能性がある。生物を対象とした場合、標本は当然ながら生きていた頃の動きを再現することは不可能であるが、3DCG モデルにアニメーションを付加することで、本物である標本では不可能であった動きなどの再現が可能となる。図鑑を開けば生物の動きをいつでも好きなだけ観察でき、自然界おける生物の生態について理解を深めることができる。さらに、肉眼では認識できていない実物体の詳細な構造情報を、3DCG を拡大することで視覚的に認識することが可能となる。また、子供、大人といった年齢の違いや、職業、趣味など使用者に合わせた文言、マルチメディアの提供といった拡張性も予想される。

図 7.1 に示すように、既存技術である立体視・非立体視ディスプレイを用いて、3DCG モデルを掲載した様々な対象の図鑑が作成され则认为られる。本研究が実現した技術を拡張することで、昆虫以外の対象を扱った図鑑作成に応用・貢献が期待できる。

実在物を取り扱った研究者に対しては、超高精細 3DCG モデルを掲載した図鑑の提供が必要であると考えられる。ここで、超高精細とは、本研究により得られた 3DCG モデルが、あたかも現物があるかのように生物・化石・美術などの研究に適用可能な精細度を持つことをいう。例えば昆虫には図 7.6 に示すように、毛のような細かい構造物や、光沢、反射率、鏡面反射率に加え、見る角度、光源の波長で反射光が異なる構造色と呼ばれる特殊なマテリアル情報を持つものがおり、この特徴の計測と表示を実現する技術が必要となる。本研究が実現した 3 次元形状モデル、テクスチャ、マテリアル情報の取得法を拡張し、毛などの微細な突起物や構造色の計測・表示を実現することで超高精細 3DCG モデルの作成法に応用・貢献が期待できると考えられる。



図 7.6: 昆虫が有する毛と構造色の例

細かい毛を持ったハイイロチョッキリ (左) と、
光沢、反射率、鏡面反射率に加え、見る角度、光源の波長で反射光が異なる
構造色と呼ばれる特殊なマテリアル情報を持つニジイロアシナガゾウムシ (下)

第 8 章

結論

本章では、本論文の成果と、今後の課題について述べる。

8.1 本論文の成果

本論文では、デジタル昆虫図鑑のための高精細 3DCG 作成技術の研究・開発として、昆虫を対象とした 3 次元形状モデル、テクスチャ、マテリアル情報（透過・拡散）、動きの取得法とコンテンツ作成のフレームワークの提案、展示向け図鑑システムの開発を行った。

3 次元形状モデルとテクスチャの取得法 従来の手法では被写界深度の影響から適用が困難であった昆虫に対し、薄い光の膜を生成するスリット型光源の開発を行い、カメラのフォーカスエリアのみを照明することで周囲のぼけ成分を除去する方法を考案し、3 次元形状モデルとすべての画素にピントの合ったテクスチャの取得を可能とした計測法を確立、これを適用した計測装置を実現した。

マテリアル情報（透過・拡散）の取得法とレンダリング法 従来の手法では取得が困難であった半透明物体と背景の距離に応じて見られる透過・拡散現象に由来するマテリアル情報を、画像から画素ごとに計測する手法を考案し、計測装置の開発、およびレンダリング法の研究を行い、半透明物体のモデリング手法を確立した。

動きの取得法 自然環境で撮影した動画像からモーション情報を取得する手法を開発し、自然環境下における昆虫動作をリアルに再現することに成功した。

本論文の主要な成果は次の 2 点である。

1. 昆虫を対象とした 3 次元形状モデル、テクスチャ、マテリアル情報（透過・拡散）、動きの取得法を確立

本論文では、実在物の中でも複雑な 3 次元形状モデル・テクスチャを有し、また手足、体長など多様性に富んだ昆虫を対象とし、これまで取得が困難であった 3 次元形状モデル、テクスチャ、マテリアル情報（透過・拡散）、動きを取得するための要素技術の確立に成功した。

2. デジタル昆虫図鑑の実用、応用

高精細 3DCG 作成技術によって作成した CG モデルを用い、web デジタル昆虫図鑑、成長過程を扱ったデジタル昆虫図鑑、インタラクティブ・デジタル昆虫図鑑、ステレオ 3D デジタル昆虫図鑑の 4 種のデジタル昆虫図鑑を開発し、実際に博物館・科学館などにおいて展示を行った。

またデジタル昆虫図鑑展示システムの一部を拡張し、工業・製造業への応用を行い、本論文の研究・開発が昆虫以外の対象においても有効であることを示した。

第 1 章では、本論文の背景として図鑑の歴史から対象の特徴をイラストとして詳細に記述する方向性、デジタル化によるマルチメディアの利用や検索・リンク・データベース化

などの機能拡張の方向性があることを述べ、デジタル昆虫図鑑に関する課題を整理し、本研究の目的と進め方を示した。

第2章では、デジタル昆虫図鑑、実在物からの3次元形状モデル・テクスチャの取得法、透過・拡散現象に由来するマテリアル情報の取得法、動きの取得法に関する研究を整理し、本論文の課題、特色を明らかにした。

第3章では、昆虫の3次元形状モデルとテクスチャの取得を可能とした、スリット型光源を用いた計測手法・装置の研究・開発について述べた。実世界の物体を計測することで3次元形状モデルを取得する方法として、接触式プローブを用いた方式、パターン投影法、共焦点法、ステレオ法、Depth from Focus 法、いずれの手法も昆虫を対象とした3次元形状モデルの取得が困難であった。X線CT法は昆虫の3次元形状モデルの取得は可能であるが、昆虫の模様や色といったテクスチャを取得することができない。そこで本論文では、厚さ数 mm のスリット型の光を照射する光源を開発し、それを用いてカメラのフォーカスエリアのみを照射することで3次元形状モデルの取得とすべての画素にピントの合ったテクスチャの取得技術を確立した。

第4章では、昆虫の翅・体などに見られる透過・拡散のマテリアル情報の取得法、レンダリング法について述べた。昆虫の特徴としてマテリアル情報が挙げられる。マテリアル情報とは、一般に発光率、拡散率、光沢、反射率、鏡面反射率、透過率、屈折率、などで構成されており、一般にはCGクリエイターによって手作業で作成される。昆虫においては体の部位ごとで異なった複雑なマテリアル情報を有しているため、これらを手作業で作成することは非常に困難である。

第4章では、透過・拡散現象に由来するマテリアル情報に着目し、3次元空間の立体角中の光束から、光度、輝度、照度を用いたばかしモデルを提議し、透過・拡散に関するマテリアル情報の取得、および透過・拡散を考慮したレンダリング法を実現した。

第5章では、昆虫の動きを取得するために開発した簡易モーションキャプチャーシステムの研究・開発について述べた。昆虫には、歩行、飛翔、捕食、威嚇、警戒、などの動きに関した特徴がある。3Dモデルを用いて実現されるデジタル昆虫図鑑においては、昆虫の動きを掲載することは、昆虫の同定・学習を手助けするために必要である。

これまでのデジタル昆虫図鑑には、CGクリエイターによって作成されたアニメーションを使用したものがあるが、自然な動きを作りこむには膨大な労力と時間が必要となり、実際には制作費の面で限界があるため実測による取得が必要であると考えられる。人間の動きを計測する手法として、モーションキャプチャーが有名である。モーションキャプチャーはスポーツ選手の動きの取得・解析や、映画においては人間の動きをCGモデルに適用してするために用いられ、光学式、機械式、磁気式、機械学習による方式などがある。これらの手法は人間用に設計されており、これらをそのまま昆虫に適用することは困難である。

第5章では、昆虫の動きを動画像で観察し、手動で特徴点を抽出、移動・回転成分を除去したのち、キーフレームアニメーション作成のためのガイド動画を出力することで昆虫の動きを取得する技術を実現した。

第6章では、デジタル昆虫図鑑の実用と応用として、コンテンツ作成手順と、実際に開発した展示用デジタル昆虫図鑑システム、および応用について述べた。

第7章では、デジタル昆虫図鑑に関する技術や実用化を踏まえ、未来の図鑑の可能性について述べ、本論文の技術が貢献できる点を示した。

8.2 今後の課題

今後の課題を次に示す。

透過・拡散以外のマテリアル情報の取得 図 8.1 中の黒字で示すように、本研究により、透過・拡散現象に由来するマテリアル情報の取得が実現された。しかしながら、昆虫には光沢、反射率、鏡面反射率や、構造色といったマテリアル情報を有したものがいる。第 7 章で述べたように、これらのマテリアル情報の計測と表示技術の実現は研究用図鑑において重要な要素である。これらのマテリアル情報を実測により取得し、表現するために頂点・画素ごとの高速演算を行う Shader¹ を用いた手法などが求められる。

モーションキャプチャシステムの自動処理化 本論文では簡易モーションキャプチャシステムを開発することで、自然環境下における昆虫の動きの取得を実現した。しかしながら、提案手法には手動による操作が多く存在するため、データの大量化が難しい。特徴点のトラッキング機能など動きの取得を自動処理化する技術が求められる。

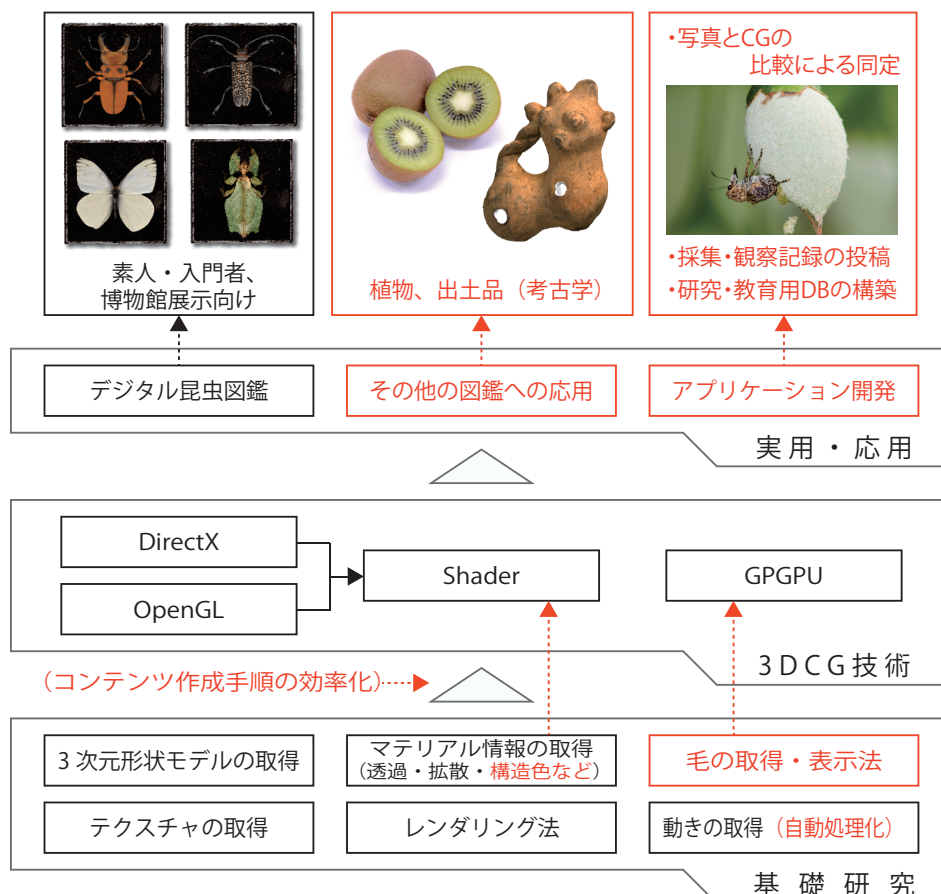


図 8.1: 今後の課題
課題を赤字で示す

¹ライティング、シェーディング、レンダリングのための命令群

毛の取得、表現 本論文では、複雑な形状をもった昆虫を対象に、3次元形状モデルの取得を実現した。しかしながら、提案手法では昆虫の微細な毛までを取得することは実現されていない。第7章で述べたように、毛の取得と表示技術の実現は研究用図鑑において重要な要素である。毛の取得法について研究を進めると共に、これまでリアルタイム処理が困難であった昆虫の毛を、図 8.1 に示す GPGPU² などを用いた処理の高速化により実現することで、研究用とにおいても有用な CG モデルを掲載したデジタル昆虫図鑑の実現が期待できる。

コンテンツ作成手順の効率化 3次元形状モデルの修正、位置合わせ、テクスチャの境界修正などの工程を自動・半自動化することでコンテンツ作成の効率化が期待できる。第7章で述べたように、今後大量の 3DCG データを図鑑に掲載するために、コンテンツ作成手順の効率化が必要である。

他分野の図鑑・用途（映画など）への応用 生物、工業・製造業の分野においては、一部応用を実施し、本論文の成果が有効に応用できることを確認した。今後は出土品などの考古学の分野や、映画などの映像の分野など、他分野への用途において、本論文の技術を応用が期待できる。

アプリケーション開発 第7章で述べた携帯型端末を利用した図鑑は、近い未来において有用であると考えられる。写真と 3DCG の比較による検索技術の確立や、ネットワーク上の DB との連携など、アプリケーションの開発が望まれる（図 8.1 参照）。

現代の生活では、昆虫と触れ合う機会は非常に減少したと思われる。幼少期に昆虫観察の体験を通して得られた発見や驚きは、誰もが与えられるべき大自然からの大切な贈り物とは思考であろうか。本論文の技術によって実現されたデジタル昆虫図鑑をとおして、子どもたちに昆虫との触れ合いの機会を提供していきたい。

² General Purpose Graphics Processing Unit の略。GPU を用いて汎用的な計算、処理を行う技術

謝 辞

昆虫を対象にした3次元計測という刺激的な研究の機会をいただき、また長年ご指導いただきました慶應義塾大学名誉教授 兼 STU 研究所所長 小檜山 賢二 博士に心より感謝致します。国内外での活動や展示など、数多くの刺激的かつ魅力的な環境の下、研究をさせていただきました。本当にありがとうございました。

学位取得に向け、手とり足取り数々のご指導をいただきました環境情報学部教授 兼 政策・メディア研究科委員 兼 SFC 研究所所長 小川 克彦 博士に深く感謝致します。研究者として今後進むにあたりアドバイスいただいた心構えを忘れずに精進致します。

COE プログラムにおいて数々の新しい体験や、共同研究のご機会をいただき、また10年間の博士課程の中で様々なアドバイスをいただきました、環境情報学部教授 兼 政策・メディア研究科委員長 徳田 英幸 博士に深く感謝致します。

学位取得に向け、様々なご指摘、アドバイスをいただいた、環境情報学部准教授 兼 政策・メディア研究科委員 脇田 玲 博士に深く感謝致します。昆虫3DCG、図鑑がもたらす未来を具体化しつつ、ご期待に沿いたいと考えております。

10年間に渡り本研究に力強いご協力をいただいた慶應義塾大学 環境情報学部 非常勤講師 齋藤 達也 博士、上村 周平 氏、竹原 ルミ子 氏に感謝致します。これからの昆虫3DCGの新しい研究や展示において、今後とも何卒よろしくお願い致します。

日常の議論を通じて多くの知識や示唆をいただいた独立行政法人 理化学研究所 横田 秀夫 博士、吉澤 信 博士、井尻 敬 博士、俵 丈展 博士、画像情報処理研究チームの皆様へ感謝致します。生物の可視化や web 公開ソフトウェアの研究・開発など数多くの機会をいただき誠にありがとうございました。また理化学研究所 VCAD システム研究プログラムにおいては、新しい研究の機会、そして数々のアドバイスをいただきました、理化学研究所 牧野内 昭武 博士、須長 秀行 博士、見原 俊介 博士、神田 敦子 氏に感謝致します。理研ギャラリー常設展示システムの開発においてお世話になりました、理化学研究所 広報室 井上 晃 氏に感謝致します。

X 線 CT 装置を用いた研究では、装置の稼働と3次元画像処理、再構成処理についてご支援をいただきました東京大学 工学部 精密工学科 准教授 大竹 豊 博士、東京大学 先端科学技術研究センター 教授 鈴木 宏正 博士に感謝致します。また試作、計測、実験において数々のサポートを頂きましたテスコ株式会社 伊藤 誠浩 氏、日本ビジュアルサイエンス株式会社 代表取締役 滝 克彦 氏に感謝致します。昆虫の体内観察、成長過程などのコンテンツ作成の可能性が広がりました。本当にありがとうございました。

光の振る舞いについてアドバイスをいただいた株式会社フォブ 大出 孝博 氏に感謝致します。的確なアドバイスにより、マテリアル情報（透過・拡散）の取得法の研究を進めることが出来ました。本当にありがとうございました。

博物館展示、プラネタリウム展示に際しご協力をいただいた財団法人 日本科学技術振興財団 奥野 光 氏、株式会社オリハルコンテクノロジーズ 高幣俊之 氏に感謝致します。来

館者様からの声を聞ける貴重な機会を頂きました。また大型ドームで上映した昆虫の S3D 映像は大変迫力のあるものでした。今後も引き続きご協力頂けましたら幸いです。

立体視を用いた展示では、映像・システムへのアドバイスを頂いた早稲田大学大学院 国際情報通信研究科 金 相賢 博士、株式会社アスナ 松廣 憲治 氏、河野 通之 氏、杉浦 和浩 氏に感謝致します。S3D 映像を用いた新しい挑戦にお付き合いいただき、本当にありがとうございました。

東京国立博物館の展示においてお世話になりました 河内 晋平 氏、及川 穰 氏、品川 欣也 氏に感謝致します。斜め置き of S3D 映像という新しい取り組みに対し、博物館展示の知見から頂いた数々のアドバイスによって展示物を形にすることができました。本当にありがとうございました。

研究成果の展示にあたり、お世話になりました博物館、科学館、企業の皆様に感謝致します。皆様のご協力により 20 件以上の展示を実施することが出来ました。

本論文は 10 年間の研究の集大成です。本当にたくさんの人に支えられ、叱咤激励され、博士論文としてまとめることが叶いました。お世話になりましたすべての皆様に深く感謝致します。

最後に、本研究の根源であり、多様性に満ち、良くも悪くも強烈なインパクトを万人に与え、人間の創造力を刺激してやまない魅惑の生物、昆虫と、それを育んだ大自然に感謝致します。

本研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) 実画像による超高精細 3 次元モデルのネットワーク上での活用に関する研究」、および文部科学省 科研費 18300036, 19650019, 20680003 の助成を受けたものです。

第 3 章は、画像電子学会誌に掲載された論文 [63] の一部を転載しています。第 4 章は、電子情報通信学会誌に掲載された論文 [64] の一部を転載しています。

参考文献

- [1] 神農本草經. 25 ~ 280.
- [2] 陶弘景. 本草經集注. 500.
- [3] 李時珍. 本草綱目. 1578.
- [4] 国立国会図書館. 描かれた動物・植物 江戸時代の博物誌.
<http://www.ndl.go.jp/nature/cha1/>.
- [5] 中村てきさい. 訓蒙図彙. 1666.
- [6] 狩野重賢. 草木写生春秋之巻. 1657.
- [7] 潜蛭子. 六々貝合和歌. 1690.
- [8] 渡部主税. 貝茂塩草. 1741.
- [9] Z. B. Kiman and K. V. Yeargan. Development and reproduction of the predator *orior insidiosus* (hemiptera: Anthocoridae) reared on diets of selected plant material and arthropod prey. *Annals of the Entomological Society of America*, Vol. 78.4, pp. 464–467, 1985.
- [10] H.E. エヴァンズ, 日高敏隆 (訳). 虫の惑星. 早川書房, 1967.
- [11] 日本昆虫学会. <http://www.entsoc.jp/home.htm>.
- [12] 喜多川歌麿. 画本虫えらみ. 耕書堂蔦屋重三郎, 1788.
- [13] 栗本丹洲. 千虫譜. 1811.
- [14] Jean-Henri Fabre. *Souvenirs entomologiques*. 1879.
- [15] 松村松年. 日本千虫図解. 警醒社, 1904.
- [16] 加藤正世. 分類原色日本昆虫図鑑. 厚生閣, 1933.
- [17] 新潟日報事業社出版部. 新潟県昆虫図鑑. 新潟日報事業社, 1981.
- [18] 小檜山賢二. 鳳蝶 日本蝶類生態写真集. 講談社, 1986.
- [19] 海野和男. 東京昆虫図鑑. 筑摩書房, 1988.
- [20] 木野田君公. 札幌の昆虫. 北海道大学出版会, 2006.
- [21] 海野和男. 昆虫顔面大博覧会 : 日本の昆虫たち. 人類文化社, 2001.
- [22] 小檜山賢二. 象虫 - Micro Presence 1. 出版芸術社, 2009.

- [23] 小檜山賢二. 葉虫 - Micro Presence 2. 出版芸術社, 2011.
- [24] 小檜山賢二. 塵騙 - Micro Presence 3. 出版芸術社, 2013.
- [25] Sony. DATA Discman DD-1.
<http://www.sony.net/Fun/design/history/product/1990/dd-1.html>, 1990.
- [26] 山口真弘. 電子書籍端末ショーケース : DD-1 ソニー.
<http://ebook.itmedia.co.jp/ebook/articles/1207/19/news009.html>, 2012.
- [27] ソニー株式会社. 電子ブックプレーヤー DD-S35.
<http://www.sony.jp/CorporateCruise/Press/200004/00-0419/>, 2000.
- [28] LogoVista. ブリタニカ国際大百科事典 小項目版 2014, 2014.
- [29] LogoVista. 日本文芸社 季節の野草・山草図鑑.
- [30] Dreams Come True Inc. 88 星座図鑑, 2013.
- [31] Touch Press. The elements ver. 2.0. iPhone/iPad 用ソフトウェア. 2013.
- [32] Hulmo Inc. 動く！動物図鑑. iPhone 用ソフトウェア, 2011.
- [33] Hulmo Inc. 動く！爬虫類・両生類図鑑. iPhone 用ソフトウェア, 2012.
- [34] Knowledge System Inc. 花しらべ 花認識/花検索. iPhone 用ソフトウェア, 2013.
- [35] Encyclopedia britannica. <http://www.britannica.com/>.
- [36] Hathi trust. <http://www.hathitrust.org/>.
- [37] The biodiversity heritage library. <http://www.biodiversitylibrary.org/>.
- [38] M. Morita, T. Tawara, M. Nishimura, S. Yoshizawa, B. Chou, I. Kuroki, T. Ijiri, Y. Tsujimura, R. Himeno, and H. Yokota. Biomedical image communication platform. *Proc. of International Symposium on Computing and Networking, (BIR'13: Int. Workshop on BioImage Recognition)*, pp. 281–287, 2013.
- [39] Christoph Benisch. Beetles fauna of the german. <http://www.kerbtier.de/>.
- [40] デジタル昆虫図鑑. <http://www.saturn.dti.ne.jp/~dinsects/>.
- [41] Alexander Slutsky. Alsphotopage. <http://alsphotopage.com/>.
- [42] Tenebrionidae. <http://www.tenebrionidae.net/>.
- [43] Beetles and coleopterists. <http://www.zin.ru/Animalia/Coleoptera/>.

- [44] Cassidinae of the world.
<http://www.biol.uni.wroc.pl/cassidae/katalog%20internetowy/index.htm>.
- [45] Chrysomelidae.
<http://www.biol.uni.wroc.pl/cassidae/European%20Chrysomelidae/index.htm>.
- [46] The insect world of israel. <http://www.nature-of-oz.com/>.
- [47] Catalog of the hispines of the world.
http://entomology.si.edu/Collections_Coleoptera-Hispines.html.
- [48] 海野和男. マルチメディア昆虫図鑑. アスキー, 1995.
- [49] NEC インターチャネル株式会社. 図鑑おもしろ博士 第1巻 昆虫1 甲虫編. パソコン用ソフトウェア, 1996.
- [50] 海野和男. マルチメディア蝶図鑑. アスキー, 1997.
- [51] 学研マルチメディア図鑑・昆虫. 学研教育出版, 2002.
- [52] 株式会社ラティオインターナショナル. 昆虫図鑑. パソコン用ソフトウェア, 2005.
- [53] 株式会社ラティオインターナショナル. デジタル昆虫博物館. パソコン用ソフトウェア, 2005.
- [54] 株式会社スパイク. クイズ&タッチけんさく 虫図鑑 DS ”虫を探そう・調べよう”. ニンテンドー DS 用ソフトウェア, 2007.
- [55] AstroArts Inc. 海野和男の虫ナビ. iPhone 用ソフトウェア, 2011.
- [56] NEC BIGLOBE Ltd. 世界のカブト・クワガタ図鑑. iPhone・Android 用ソフトウェア, 2012.
- [57] Ltd InformationPort Co. The 3D 昆虫 Ver. 1.5 カブトムシ・クワガタムシ編. iPhone 用ソフトウェア, 2013.
- [58] BoyCraft. 巨虫図鑑 vol. 1. iPhone/Android 用ソフトウェア, 2013.
- [59] 小学館. 日本のコウチュウ（カブトムシのなかま）図鑑 neo for iphone. iPhone 用ソフトウェア, 2010.
- [60] 小島弘昭, 森田正彦, 小檜山賢二. 日本産ゾウムシデータベース.
<http://kogane.wem.sfc.keio.ac.jp/jwdb/>.
- [61] 日本産アリ類画像データベース. <http://ant.edb.miyakyo-u.ac.jp/>.

- [62] 小島弘昭, 森田正彦, 小檜山賢二. 「あきつ賞」 受賞サイト (12) 日本産ゾウムシ上科甲虫の画像付き種情報データベース. 昆虫. ニューシリーズ, Vol. 16, No. 1, pp. 39–42, 2013.
- [63] 森田正彦, 齋藤達也, 栗原聡, 小檜山賢二. スリット光を用いた 3 次元モデル撮影システムの設計と実装. 画像電子学会誌, Vol. 33, No. 4B, pp. 555–564, 2004.
- [64] 森田正彦, 齋藤達也, 小檜山賢二. IBMR による半透明物体の測定法, 及び表現法 (イメージ・ベースドモデリング/レンダリング, <特集>画像の認識・理解論文). 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム, Vol. 90, No. 8, pp. 2094–2104, 2007.
- [65] Masahiko Morita, Tastuya Saito, and Kenji Kohiyama. A virtual environment for archiving micro-presence with image-based model acquisition. *Proceedings of The Second International Conference on Computer Graphics Theory and Applications*, pp. 145–152, 2007.
- [66] 株式会社ユウシステム. 自動多角度撮影システム, 2010.
- [67] 井口征士, 佐藤宏介. 三次元画像計測. 昭晃堂, 1990.
- [68] Inokuchi S, Sato K, and Matsuda F. Range imaging system for 3d object recognition. In *Proceedings of the 7th International Conference on Pattern Recognition*, pp. 806–808. IEEE Computer Society Press, 1984.
- [69] Marvin Minsky. Microscopy apparatus, December 19 1961. US Patent 3,013,467.
- [70] Juan-José Aguilar, F Torres, and MA Lope. Stereo vision for 3d measurement: accuracy analysis, calibration and industrial applications. *Measurement*, Vol. 18, No. 4, pp. 193–200, 1996.
- [71] R. A. Jarvis. A perspective on range finding techniques for computer vision. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 2, pp. 122–139, 1983.
- [72] Robert E Alvarez and Albert Macovski. Energy-selective reconstructions in x-ray computerised tomography. *Physics in medicine and biology*, Vol. 21, No. 5, p. 733, 1976.
- [73] Gabor T Herman. *Fundamentals of computerized tomography: image reconstruction from projections*. Springer, 2009.
- [74] 風間直子. CG のための透明物体の光学特性の測定およびその表現方法. 奈良先端科学技術大学院 大学情報科学研究科 修士論文, 1999.

- [75] Hiroto Matsuoka, Tatsuto Takeuchi, Hitoshi Kitazawa, and Akira Onozawa. Representation of pseudo inter-reflection and transparency by considering characteristics of human vision. In *Computer graphics forum*, Vol. 21, pp. 503–509. Wiley Online Library, 2002.
- [76] Wojciech Matusik, Hanspeter Pfister, Remo Ziegler, Addy Ngan, and Leonard McMillan. Acquisition and rendering of transparent and refractive objects. In *Proceedings of the 13th Eurographics workshop on Rendering*, pp. 267–278. Eurographics Association, 2002.
- [77] Srinivasa G Narasimhan and Shree K Nayar. Shedding light on the weather. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. Proceedings. 2003 IEEE Computer Society Conference on*, Vol. 1, pp. I–665. IEEE, 2003.
- [78] Max Fleischer. Method of producing moving-picture cartoons, October 9 1917. US Patent 1,242,674.
- [79] Carol M Ginsberg and Delle Maxwell. Graphical marionette. In *Proc. of the ACM SIGGRAPH/SIGART interdisciplinary workshop on Motion: representation and perception*, pp. 303–310. Elsevier North-Holland, Inc., 1986.
- [80] Ramesh Raskar, Hideaki Nii, Bert Dedecker, Yuki Hashimoto, Jay Summet, Dylan Moore, Yong Zhao, Jonathan Westhues, Paul Dietz, John Barnwell, et al. Prakash: lighting aware motion capture using photosensing markers and multiplexed illuminators. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 26, p. 36. ACM, 2007.
- [81] JRW Morris. Accelerometry a technique for the measurement of human body movements. *Journal of Biomechanics*, Vol. 6, No. 6, pp. 729–736, 1973.
- [82] Eric R Bachmann. Inertial and magnetic tracking of limb segment orientation for inserting humans into synthetic environments. Technical report, DTIC Document, 2000.
- [83] Ankur Agarwal. *Machine learning for image based motion capture*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2006.
- [84] David P Gibson, DJ Oziem, Colin J Dalton, and Neill W Campbell. Capture and synthesis of insect motion. In *Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pp. 39–48. ACM, 2005.
- [85] Jure Zakotnik, Tom Matheson, and Volker Dürer. A posture optimization algorithm for model-based motion capture of movement sequences. *Journal of neuroscience methods*, Vol. 135, No. 1, pp. 43–54, 2004.

- [86] Berthold Klaus Paul Horn. Focusing. *Artificial Intelligence Memo No. 160*, MIT, 1968.
- [87] John F Schlag, Arthur C Sanderson, Charles P Neuman, and Francis C Wimberly. *Implementation of automatic focusing algorithms for a computer vision system with camera control*. Citeseer, 1983.
- [88] Eric Krotkov. Focusing. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 1, No. 3, pp. 223–237, 1988.
- [89] Shree K. Nayar. Shape from focus system. *Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 302–308, 1992.
- [90] Murali Subbarao, Tae Choi, and Arman Nikzad. Focusing techniques. *Machine Vision Applications Architectures, and Systems Integration (Proceedings of SPIE): 17-18 November 1992; Boston*, pp. 163–174, 1992.
- [91] John Ens and Peter Lawrence. A matrix based method for determining depth from focus. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 1991. Proceedings CVPR'91., IEEE Computer Society Conference on*, pp. 600–606. IEEE, 1991.
- [92] Alex Paul Pentland. A new sense for depth of field. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, No. 4, pp. 523–531, 1987.
- [93] Alexander Pentland, T Darrell, M Turk, and W Huang. A simple, real-time range camera. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 1989. Proceedings CVPR'89., IEEE Computer Society Conference on*, pp. 256–261. IEEE, 1989.
- [94] Murali Subbarao and T-C Wei. Depth from defocus and rapid autofocusing: a practical approach. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 1992. Proceedings CVPR'92., 1992 IEEE Computer Society Conference on*, pp. 773–776. IEEE, 1992.
- [95] Murali Subbarao. Parallel depth recovery by changing camera parameters. *International Conference on Computer Vision*, pp. 149–155, 1988.
- [96] Berthold Klaus Paul Horn. Efficient depth recovery through inverse optics. *Machine Vision for Inspection and Measurement*, pp. 101–126, 1989.
- [97] Murali Subbarao and Gopal Surya. Application of spatial-domain convolution/deconvolution transform for determining distance from image defocus. *Computer Vision Laboratory, Stony Brook, Tech. Report*, Vol. 92, p. 18, 1992.

- [98] Shang-Hong Lai, Chang-Wu Fu, and Shyang Chang. A generalized depth estimation algorithm with a single image. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, Vol. 14, No. 4, pp. 405–411, 1992.
- [99] 児玉和也, 相澤清晴, 羽鳥光俊. 複数画像からの全焦点画像の再構成. 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-情報処理, Vol. 80, No. 9, pp. 2298–2307, 1997.
- [100] Tatsuya Saito, Satoshi Kurihara, SS Fisher, and K Kohiyama. Micro archiving. *ACM SIGGRAPH Sketches and Applications*, 2001.
- [101] 徐剛, 辻三郎. 3次元ビジョン. 共立出版, 1998.
- [102] 佐藤淳. コンピュータビジョン - 視覚の幾何学 -. コロナ社, 1999.
- [103] Scott S Fisher, Tatsuya Saito, Ian E McDowall, Yuuta Nakayama, Mark T Bolas, and Kenji Kohiyama. Micro-archiving and interactive virtual insect exhibit. In *Electronic Imaging 2002*, pp. 375–381. International Society for Optics and Photonics, 2002.
- [104] D Huber, M Keller, and D Robert. 3D light scanning macrography. *Journal of microscopy*, Vol. 203, No. 2, pp. 208–213, 2001.
- [105] 宮崎大輔, 池内克史. 偏光レイトレーシング法による透明物体の表面形状の推定手法 (コンピュータビジョン, <特集>画像の認識・理解論文). 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-パターン処理, Vol. 88, No. 8, pp. 1432–1439, 2005.
- [106] 佐藤いまり, 岡部孝弘, 佐藤洋一, 池内克史. 任意光源環境における画像生成のための物体の見えの標準化 (コンピュータビジョン基盤技術, <特集>画像の認識・理解). 情報処理学会論文誌. コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 47, No. 10, pp. 107–119, 2006.
- [107] 中前栄八郎, 西田友是. 3次元コンピュータ・グラフィックス. 昭晃堂, 1986.
- [108] 千葉則茂, 村岡一信. CによるCGレイトレーシング. サイエンス社, 1991.
- [109] 中嶋正之. 3次元CG. オーム社, 1994.
- [110] Henrik Wann Jensen, 苗村健. フォトンマッピング: 実写に迫るコンピュータグラフィックス. オーム社, 2002.
- [111] 久保田広. 光学. 岩波書店, 1964.
- [112] 照明学会. 照明ハンドブック. オーム社, 2003.
- [113] 黒田和男. 光学 (東京大学レクチャーノート). 2006.

- [114] 森田正彦, 覚正信徳, 小檜山賢二, 小川克彦, 横田秀夫. 生物情報の web 公開を目的としたメッシュボリュームビューアの開発. ポスター, 理研シンポジウム, VCAD システム研究 2009, 2010.
- [115] 横田秀夫, 工藤謙一, 樋口俊郎, 相良泰行, 都甲洙. 3 次元内部構造顕微鏡による凍結生体試料の観察と計測. 低温生物工学会誌, Vol. 44, No. 1, pp. 1–9, 1998.
- [116] Scott S Fisher. Environmental media: accessing virtual representations of real-time sensor data and site-specific annotations embedded in physical environments. In *Virtual Systems and Multimedia, 2001. Proceedings. Seventh International Conference on*, pp. 407–418. IEEE, 2001.
- [117] Scott S Fisher. An authoring toolkit for mixed reality experiences. In *Entertainment Computing*, pp. 487–494. Springer, 2003.
- [118] Yahoo! JAPAN. さわれる検索. <http://sawareru.jp/>.

付 録 A

昆虫CGのアニメーション

第3章の技術によって取得した3次元形状モデルとテクスチャに、第5章の技術により取得した昆虫の動きを適用して作成したアニメーションを示す。














A.1 カミキリムシ

表 A.1: 取得した動きを適用したカミキリムシの歩行アニメーション



A.2 クワガタムシ

表 A.2: 取得した動きを適用したクワガタムシの歩行アニメーション

0.0 sec  	0.5 sec  	1.0 sec  	1.5 sec  
2.0 sec  	2.5 sec  	3.0 sec  	3.5 sec  
4.0 sec  	4.5 sec  	5.0 sec  	5.5 sec  
6.0 sec  	6.5 sec  	7.0 sec  	7.5 sec  
8.0 sec  	8.5 sec  	9.0 sec  	9.5 sec  

A.3 ゾウムシ

表 A.3: 取得した動きを適用したゾウムシの歩行アニメーション



付 録 B

ステレオ3D デジタル昆虫図鑑

昆虫が持つ複雑な3次元形状とテクスチャ情報を効果的に演出するために、立体視を取り入れた上映用ステレオ3Dデジタル昆虫図鑑の開発を行った。表B.1に、制作した映像のシナリオを示す。

表 B.1: 上映用ステレオ3D デジタル昆虫図鑑のシナリオ

映像	ナレーション
	Scene 01:
	Scene 02: 大きな顎が特徴的ですが、クワガタムシではありません。とても凶暴で指を挟まれると怪我をします。ペルーに生息しています。
	Scene 03: 大柄な体と、とても長い角をもった昆虫です。中南米に生息しており、世界最大のカブトムシと言われています。
	Scene 04: カブトムシのような角と金属質な光沢をもった体が特徴的な昆虫です。マレーシアに生息しています。
	Scene 05: 長い前足と、光沢感をもった体が特徴的な昆虫です。ベトナム北部に生息しています。

映像	ナレーション
 <p>ギラファノコギリクワガタ <i>Protoparce giraffa</i> (ネパール、タイ、ミャンマー)</p>	<p>Scene 06:</p> <p>クワガタムシの中で最も大きな体をしています。とても大きな顎をもっていますが、実は挟む力はそれほど強くありません。</p>
 <p>メンガタクワガタ <i>Himantopus nalis</i> (オーストラリア)</p>	<p>Scene 07:</p> <p>とても大きな頭をもつことから、日本ではメンガタクワガタと呼ばれています。明るい赤茶色の体と大きな頭部が特徴で、背面にある黒いスポット模様が顔のように見える不思議な姿をしています。生態も不思議な昆虫で、角で物を挟みません。</p>
 <p>エメラルドクチャブツウムシ <i>Euphoria imperialis</i> (ブラジル)</p>	<p>Scene 08:</p> <p>エメラルド色のきれいな体をもったゾウムシです。あまりにもきれいなため、キーホルダーなどに加工されたりもします。</p>
 <p>コモシロシロジカミキリ <i>Kriegerella ornata</i> (パプアニューギニア)</p>	<p>Scene 09:</p> <p>コモシロシロジカミキリは背中に黒い斑点と、白と赤の鮮やかな模様があります。カミキリムシは長い触角であたりを探りながら歩きます。飛ぶときは4枚の羽を広げ、後にある薄い羽根をはばたかせます。このとき、羽ばたきの邪魔にならないように、前足と中足は万歳をしたような形をしています。主にパプアニューギニアに生息しています。</p>

映像	ナレーション
	<p>Scene 10:</p> <p>エゴヒゲナガゾウムシは、エゴの樹の実の種の中で幼虫から成虫までを過ごす、ちょっと変わった昆虫です。</p> <p>卵から孵った幼虫は種の中身を食べて成長していきます。堅い種に守られているため、鳥などに襲われる心配はありません。</p>
	<p>Scene 11:</p> <p>7月になると、幼虫は大人になるためにサナギになります。頭部、胸部、腹部に体が分かれてきて、足や羽、触覚がしっかりとした形をもってきたのが分かります。このように昆虫は大人になるために体を作り変えます。</p>
	<p>Scene 12:</p> <p>7月下旬になると、種の中にはほぼ成虫になったエゴヒゲナガゾウムシがいます。</p>
	<p>Scene 13:</p> <p>体の大きさは6mmほどの小型の昆虫ですが、拡大して観察してみると猫のような毛が全身に生えているのがわかります。</p>
	<p>Scene 14:</p> <p>9月になると、メスのエゴヒゲナガゾウムシはエゴの実に卵を産みつけます。外側の果肉をかじり、種に穴をあけ、おしりを突っ込んで種の中に卵を産み落とします。こうして、来年もエゴヒゲナガゾウムシの幼虫は実の中で成長し、サナギ、成虫となって外に出てきます。</p>

付 録 C

工業・製造業への応用、常設展示物の 制作

本研究の展示技術の応用として取り組んだ、独立行政法人 理化学研究所 理研ギャラリー VCAD システム研究プログラム常設展示システムの図面を図 C.1 に示す。

常設展示システムの筐体は、大人も子供も見やすい高さにステレオ 3D ディスプレイを設置、また手の届く高さにジョイスティックとボタンから成るコントローラーが設置されている。さらに、10 インチモニターが設置されており、操作中のデータに関する解説が日本語と英語で表示される。コントローラーとディスプレイの間には、データとの比較のために実物が設置される展示ケースが設けてある。

筐体内部には、パソコンと UPS が格納されており、タイマー設定により定時に自動起動、自動シャットダウンする仕組みとなっている。

筐体前方と後方に設置されたファンは温度コントローラーで制御されており、内部の温度が設定値以上となった際に排熱が行われる仕組みである。

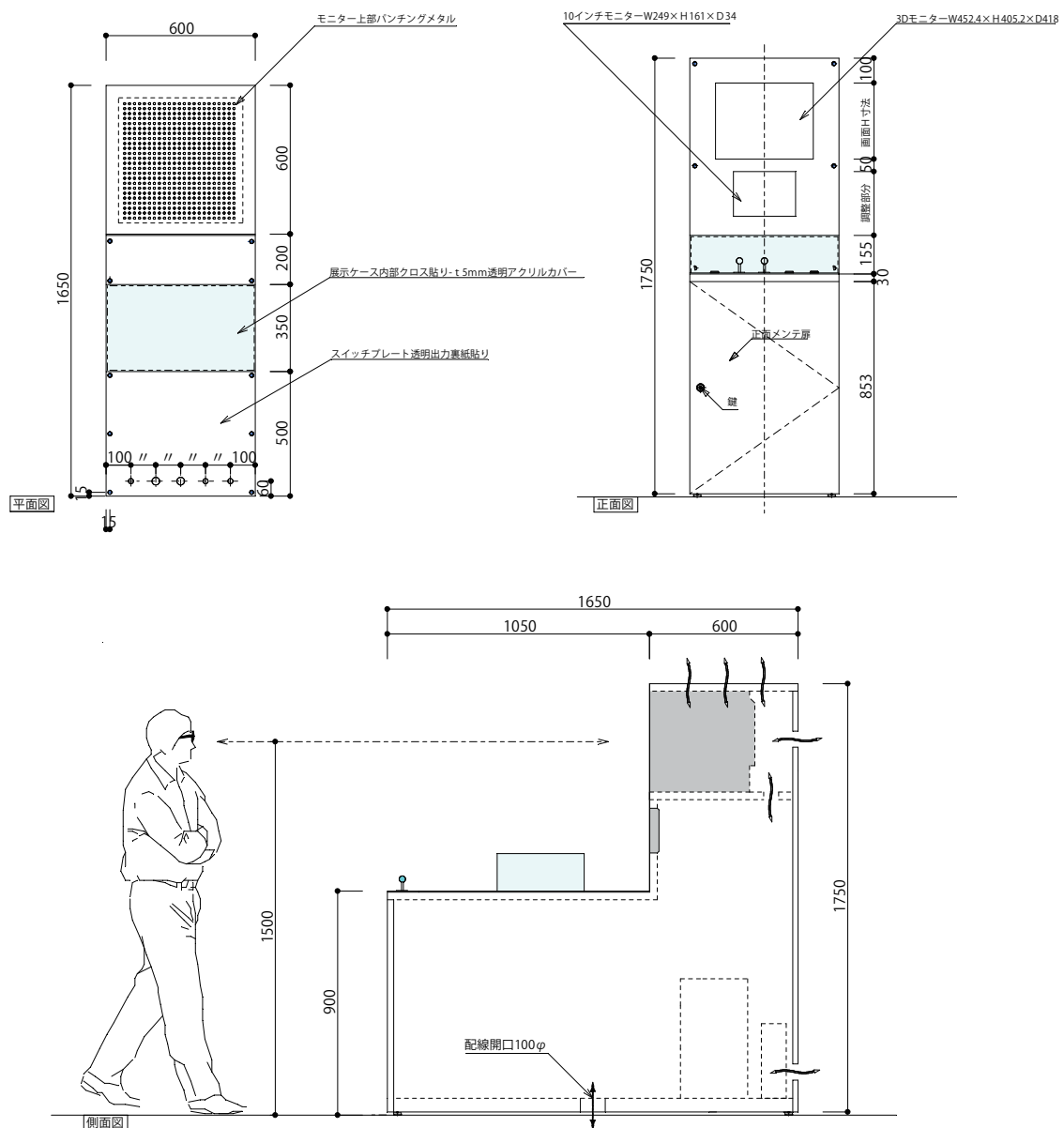


図 C.1: VCAD システム研究プログラム 常設展示システム図面

付 録 D

展示一覽

本研究の技術を用いて作成したデジタル昆虫図鑑、および展示技術を利用して行った展示の一覧を表 D.1 に示す。

表 D.1: デジタル昆虫図鑑システムを用いた展示

展示会名, 会場, 期間
第 54 回 科学技術週間 科学技術の「美」パネル展, 文部科学省 情報ひろば, 2013.04.15 ~ 04.26.
大昆虫展 in 東京タワー, 東京タワー, 2013.7.20 ~ 9.1.
特集陳列 石に魅せられた先史時代の人びと, 東京国立博物館 平成館考古展示室, 2011.08.2 ~ 10.30.
VCAD システム研究プログラム 常設展示, 独立行政法人理化学研究所 理研ギャラリー (和光研究所), 2011.04.01 より常設
CEATEC JAPAN 2010, 幕張メッセ, 2010.10.5 ~ 10.9.
FIFA2022 インспекション技術展示, ザ・リッツ・カールトン東京, 2010.7.22.
ふしぎ! 昆虫パワー, 名古屋市科学館, 2010.7.17 ~ 8.31.
特別展「大昆虫博」, 江戸東京博物館, 2010.6.22 ~ .9.5.
平成 2 2 年度定期総会・シンポジウム, 超臨場感コミュニケーションフォーラム, 2010.6.11.
Micro Presence, 科学技術館, 2009.8.10 ~ 8.30.
特別展「ムシテク展」, つくばエキスポセンター, 2009.7.5 ~ 8.31.
マイクロ・プレゼンス, 科学技術館 シンラドーム, 2008.8.19.
夏休み特別イベント ”大解剖! デジタル昆虫図鑑”, 福井原子力センター あっとほうむ, 2008.7.20 ~ 8.12.
OPEN SPACE 2008 ”マイクロ・プレゼンス”, NTT インターコミュニケーション・センター, 2008.4.19 ~ 2009.3.8.
特別展 昆虫力 「昆虫から学ぶ科学技術の最先端」, 科学技術館, 2007.8.11 ~ 26.
第 3 回 湘南四大学 産学交流テクニカルフォーラム ~ 次世代の生活環境 ~, 藤沢産業センター 6 階 研修室, 2005.3.11 ~ 3.12.
SFC OPEN RESEARCH FORUM 2004, 六本木アカデミーヒルズ 40, 2004.11.23 ~ 11.24.
湘南四大学 産学交流テクニカルフォーラム 大学技術市場, 藤沢産業センター 6 階 研修室, 2004.3.13 ~ 3.14.
読売・東大知識の構造化シンポジウム 「3 D 技術が生活を変える!」, 東京大学 安田講堂, 2003.12.16.
SFC Open Research Forum 2003, 六本木アカデミーヒルズ 40, 2003.11.20 ~ 11.21.
日本ソフトウェア科学会 WISS2003, いこいの村 能登半島, 2003.11.1.